

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

**Řešení problematiky bludných proudů  
v železniční stanici Bohumín**

*Stray currents problems in Bohumín railway station*

**2015**

**Bc. Adam Neumann**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Adam Neumann**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Řešení problematiky bludných proudů v železniční stanici Bohumín**  
**Stray currents problems in Bohumín railway station**

Zásady pro vypracování:

1. Obeznamení se s problémy působenými bludnými proudy v železniční stanici Bohumín.
2. Seznámení se s příslušnou dostupnou literaturou, zejména normami.
3. Provedení měření v terénu.
4. Vyhodnocení měření, návrh možností řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Lanáková G., Šindler D., Napájanie elektrických dráh. ALFA Bratislava 1989.
- [2] Paleček J., Vybrané kapitoly z problematiky elektrotechniky v dopravním inženýrství, VŠB-TU Ostrava 1996
- [3] ČSN 038365, Zásady měření při protikorozi ochraně kovových zařízení uložených v zemi: Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi, Únor 1987, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987
- [4] ČSN 038350, Požadavky na protikorozi ochranu úložných zařízení, Září 1996, Praha: Český normalizační institut, 1996
- [5] ČSN EN 50122-1 ed.2, Drážní zařízení-Pevná trakční zařízení-Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod: Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem, Listopad 2011, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2011

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Václav Kolář, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

**Prohlášení studenta:**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, uvedl jsem zde všechny literární prameny a zdroje, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 6.5.2015



Podpis studenta

**Poděkování:**

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Václavu Kolářovi, PhD za odborné vedení a konzultace k této diplomové práci.



## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou bludných proudů v bezprostředním okolí vlakové stanice Bohumín. Tato práce přímo navazuje na terénní měření v hale technickohygienické údržby (THU) a jejím nejbližším okolí ve vlakové stanici Bohumín.

Hlavním cílem práce je vyhledat cizí vodivé cesty v hale THU a jejím okolí, způsobující poruchy na svodech bleskosvodů chránících halu THU před atmosférickými výboji. Dále pak, v závislosti na provedeném měření, navrhnout a vyhodnotit možné způsoby odstranění zjištěných problémů.

Práce se dále zabývá vybranými problémy provozování stejnosměrné trakce, kvalitou zpětné cesty trakčních obvodů, šířením zemních proudů, elektrochemickou korozí a legislativou týkající se problematiky stavby a provozu elektrických drah.

## **Klíčová slova**

Elektrická vozba, trakční proudová soustava, trakční napájecí stanice, stejnosměrná trakce, bludný proud, zemní proud, elektrochemická koroze.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the issue of stray current in immediate surroundings of Bohumín's train station. The diploma thesis is straight continuation of field measurement in a technical and hygienic maintenance hall (THM) and its nearest surroundings of Bohumín's train station.

The main purpose of this diploma thesis is to find out unfamiliar conductive electrical pathway in THM hall and its surroundings, causing defects to leads of lightning rods that are protecting THM hall against atmospheric discharge. Next purpose is, due to previous measurement, suggest and find out possible ways of removing the identified problems.

This dissertation also deals with selected problems of direct-current traction, quality of return pathway of traction circuit, ground current propagation, electrochemical corrosion and legislation that concern issues of construction and operation of electrical railways.

## **Key Words**

Electric traction, traction current system, traction distribution station, stray current, ground current, electrochemical corrosion

## Seznam použitých symbolů a značek

VŠB-TOU	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava	
ČR	Česká Republika	
ČD	České dráhy	
SŽDC	Správa železniční dopravní cesty	
TNS	trakční napájecí stanice	
MHD	městská hromadná doprava	
THU	technickohygienická údržba	
ČSN	Česká technická norma	
EN	evropská norma	
TNŽ	Technická norma železnic	
TP	Technické podmínky	
SR	Služební rukověť	
ss	stejnoseměrný	
Cu	měď	
AlFe	hliník ocelové lano	
Cu-CuSO <sub>4</sub>	nepolarizovatelná elektroda	
U	napětí	[V]
I	proud	[A]
R	elektrický odpor, činný	[Ω]
X	elektrický odpor, jalový	[Ω]
Z	impedance	[Ω]
G	elektrická vodivost	[S]
P	výkon	[W]
J	proudová hustota	[A.m <sup>-1</sup> ]
E	intenzita elektrického pole	[V.m <sup>-1</sup> ]
S	plocha	[mm <sup>2</sup> ]
A	elektrochemický ekvivalent kovu	[kg.A <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> ]
Q	elektrický náboj	[C]
L, l, x	délka	[m]
m	hmotnost	[kg]
r	elektrický odpor na jednotku délky	[Ω.m <sup>-1</sup> ]
t	čas	[s]

$\varphi$	potenciál	[V]
$\rho$	rezistivita	$[\Omega \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\gamma$	měrná vodivost	$[\text{S} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}^{-2}]$
$\sigma$	proudová hustota zemního proudového pole	$[\text{A} \cdot \text{m}^{-2}]$
$\pi$	pí	
V	Volt	
kV	kilovolt	
A	Ampér	
kA	kiloampér	
Hz	Hertz	
$\Omega$	Ohm	
m $\Omega$	miliohm	
k $\Omega$	kiloohm	
S	Siemens	
W	Watt	
kW	kilowatt	
s	sekunda	
%	procento	
m	metr	
mm	milimetr	
km	kilometr	
mm <sup>2</sup>	milimert čtverečný	
$\Omega/\text{km}$ , $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	Ohm na kilometr	
$\text{S}/\text{km}$ , $\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$	Siemens na kilometr	
viz.	odkaz v textu	
např.	například	
Obr.	obrázek	
Tab.	tabulka	

# Obsah

1. Úvod.....	11
Cíl práce .....	11
2. Úvod do problematiky provozování elektrických trakčních soustav .....	12
Slovníček pojmů.....	13
2.1 Proudové trakční soustavy .....	13
2.1.1 Stejnosměrné trakční proudové soustavy .....	14
2.1.2 Střídavé trakční proudové soustavy .....	14
2.1.3 Trakční proudové soustavy na železnici v ČR .....	15
2.2 Způsoby napájení trakčních sítí.....	15
2.2.1 Jednostranné napájení trakčních úseků .....	15
2.2.2 Dvoustranné napájení trakční sítě .....	16
2.2.3 Čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě .....	16
2.3 Zpětné vedení .....	17
2.3.1 Zpětné vedení kolejnicí .....	17
2.3.2 Zpětné vedení kolejnicí a zemí.....	17
2.3.3 vedení zpětným lanem.....	18
3. Specifické problémy provozování stejnosměrné elektrické trakce .....	19
3.1 Úbytky napětí v trakčním obvodu .....	19
3.1.1 Odvození úbytku napětí v ustáleném stavu .....	19
Metoda výpočtu při uvažování jednoho vlaku na trati .....	21
Metoda výpočtu při uvažování více vlaků na trati .....	22
3.1.2 Modelový výpočet úbytku napětí v trakčním obvodu .....	24
Určení rozmístění vlaků na trati a jejich výkonů .....	24
Určení odporů trakčního obvodu.....	25
Výpočet úbytků napětí .....	27
3.1.3 Nepříznivé vlivy charakterizované úbytkem napětí .....	28
Zvýšení nákladů .....	28
Nepříznivé vlivy technického rázu.....	29
3.2 Bludné proudy .....	30
3.2.1 Původ bludných proudů .....	30
Přirozené zemní proudy .....	30
Zemní proudy způsobené průmyslovou činností.....	31
3.2.2 Šíření bludných proudů .....	31

Elektrické pole v okolí oblasti průmyslové činnosti .....	31
Šíření bludných proudů v okolí elektrizovaných stejnosměrných tratí .....	33
3.2.3 Korozivní účinky bludných proudů.....	34
Katodická oblast.....	34
Anodická oblast.....	34
3.2.4 Poruchové stavy vyvolávající vznik nežádoucích zemních proudů .....	35
Spojení kolejnice s ochranným vodičem distribuční sítě .....	35
Spojení kolejnice se zemničem .....	35
Odizolování neelektrizovaných tratí .....	36
<b>4. Předpisy a poznatky pro minimalizaci vzniku a účinků bludných proudů .....</b>	<b>37</b>
4.1 Diagnostika bludných proudů a měření v kolejišti.....	37
4.1.1 Měření k určení rizika vzniku elektrochemické koroze .....	37
Měření zdánlivého odporu půdy.....	37
Měření intenzity a proudové hustoty zemního proudového pole .....	38
4.1.2 Měření na stávajícím zařízení.....	39
4.1.3 Měření v kolejišti .....	40
Měření izolačního stavu kolejiště.....	40
Měření odporu kolejnice .....	40
4.2 Způsoby zabráňující vzniku elektrochemické koroze .....	41
4.2.1 Omezení vzniku bludných proudů .....	41
4.2.2 Pasivní korozivní ochrana .....	41
4.2.3 Aktivní korozivní ochrana.....	42
Přímá, polarizovaná, zesílená polarizovaná drenáž.....	42
Obětní anoda .....	42
Katodická ochrana.....	43
4.3 Nutná opatření pro zachování bezpečnosti a provozuschopnosti elektrizovaných drah .....	43
4.3.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem .....	43
4.3.2 Ochrana před potenciálem kolejnic .....	44
Krátkodobé trvání poruchy: .....	44
Přechodné trvání poruchy: .....	44
Dlouhodobé trvání poruchy:.....	45
Způsoby snížení potenciálu kolejnic: .....	45
4.3.3 Obvody zpětného proudu a ukolejnění.....	45
<b>5. Řešení problematiky bludných proudů v depu kolejových vozidel ve stanici v Bohumíně..</b>	<b>46</b>
5.1 Definice problému.....	46

5.1.1	Umístění a popis haly THU.....	46
5.1.2	Nástin příčiny zdroje problému.....	48
5.2	Měření k zjištění příčiny vzniku bludných proudů .....	48
5.2.1	Určení zdroje bludných proudů.....	48
	Metodika měření .....	48
	Výsledky měření .....	49
5.2.2	Určení směru toku proudu přes halu .....	51
	Metodika měření .....	51
	Průběh měření .....	53
	Výsledky měření .....	53
5.2.3	Dohledání příčiny vzniku bludných proudů.....	54
	Metodika měření .....	54
	Průběh měření .....	57
	Výsledky měření .....	58
5.3	Vyhodnocení měření .....	60
5.4	Navrhované způsoby odstranění problému .....	62
5.4.1	Instalace průrazky napětí.....	62
5.4.2	Oprava poškozených izolačních podložek .....	63
5.4.3	Kompletní výměna všech izolačních podložek .....	63
5.4.4	Zkvalitnění zpětné cesty.....	63
5.4.5	Instalace vlastního zdroje napětí .....	63
5.4.6	Instalace usměrňovací diody do ukolejňovacího vedení .....	63
5.4.7	Izolování podpěrné konstrukce .....	64
<b>Závěr.....</b>		<b>65</b>
<b>Seznam použité literatury a zdrojů: .....</b>		<b>67</b>
<b>Seznam příloh: .....</b>		<b>69</b>
	Příloha č. 1 .....	70
	Příloha č. 2 .....	71
	Příloha č. 3 .....	76

# 1. Úvod

Potřebu přepravovat se má člověk od nepaměti, ať už kvůli migraci, obchodu, zaměstnání, či jen z důvodu touhy poznání, nebo turismu. V prvopočátku přeprava nebyla nijak efektivní, vždyť se člověk musel spolehnout jen na vlastní nohy. Ani s vynálezem kola a výpomoci tažných zvířat k tahání vozů stále nemůžeme jistě mluvit o nějak velké efektivitě, ať už jen mluvíme o stále malých rychlostech, nebo i nedostatečné infrastruktuře. V tomto pohledu byl skutečnou revolucí vynález parního stroje, respektive jeho zdokonalení J. Wattem v 18. století, a nesmíme ani opomenout zavádění speciálních drah pro vozy, koleje. Využití parního stroje pro pohon a kolejí, jako jízdních drah, nám již dává skutečně efektivní a rychlou koncepci dopravy, můžeme mluvit o zrodu železniční dopravy.

Od té doby se vývoj železnice hnál mílovými kroky kupředu. První parní lokomotivy ohromovaly publikum rychlostmi jen lehce přesahující 30 km/h a dnes považujeme za samozřejmost provozování elektrických lokomotiv běžně jezdících rychlostí daleko přes 300 km/h. V počátcích se především rozšiřovala železniční infrastruktura a zdokonalovaly parní lokomotivy. Obrovský skok kupředu přišel se zaváděním elektrické trakce a elektrifikace tratí. Elektrická trakce přinesla do železnice nespočet výhod, jmenujme například zvyšování rychlostí, efektivnější využití energie, a tím výčet zdaleka nekončí. Ruku v ruce se však objevily i neduhy, které do té doby nebyly známy, specifické právě k provozování elektrických tratí.

V této práci přiblížím současný stav elektrických tratí v Evropě a ČR, nastíním specifické problémy provozování stejnosměrných elektrických trakcí a jejich řešení dle platných norem a nařízení. Dále se budu zabývat konkrétním problémem ve vlakové stanici v Bohumíně, popíšeme si jeho vznik a možné řešení daného problému.

## Cíl práce

Cílem této práce je rozebrat a vyhodnotit problémy se zpětnými proudy v depu kolejových vozidel ve vlakové stanici Bohumín. Analýza problémů navazuje na měření v depu v Bohumíně prováděné pracovníky VŠB-TUO na základě poptávky Českých drah.

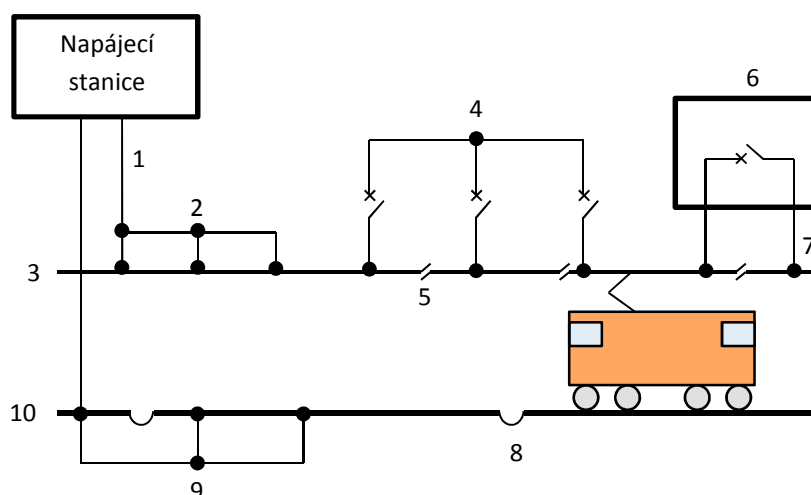
## 2. Úvod do problematiky provozování elektrických trakčních soustav

Elektrická trakce se zařazuje do nejekologičtějších způsobů přepravy a stala se nedílnou součástí železniční dopravy. V ČR je elektrizováno cca  $\frac{1}{3}$  všech tratí, a nové elektrizované úseky stále přibývají, ale například ve Švýcarsku se toto číslo blíží k 100 %.

Elektrická vozba, je napájena prostřednictvím trakčního obvodu. Obecně lze celý trakční obvod rozdělit na tyto čtyři základní části:

- Trakční napájecí stanici, která je napájena z elektrické distribuční sítě a přes napájecí vedení dodává proud do troleje.
- Trakčního vedení, jehož hlavní část tvoří trolej, popřípadě trolej a zesilovací vedení. Trakční vedení slouží k rozvodu a předávce elektrické energie lokomotivě.
- Spotřebič elektrické energie (lokomotiva a veškeré elektrické systémy ve voze).
- Zpětné vedení, sloužící k uzavření obvodu od vozidla zpět k trakční napájecí stanici.

Úplné schéma trakčního obvodu je na obrázku Obr.1.



- 1 - napájecí vedení
- 2 - zesilovací vedení
- 3 - trolejové vedení
- 4 - obcházející vedení
- 5 - úsekové děliče
- 6 - spínací stanice
- 7 - spínací vedení
- 8 - kolejnicová propojka
- 9 - zpětné vedení (kabelové)
- 10 - zpětné kolejnicové vedení

Obr. 1 – Úplné schéma trakčního obvodu



## Slovníček pojmů

**Vozba** – doprava vozidel po koleji. [26]

**Elektrická vozba** – vozba, která k pohonu hnacích vozidel používá elektrické energie, přiváděné z vnějšího zdroje nebo z akumulátoru. [26]

**Trakce** – pohon vozidla.

**Elektrická trakce** – pohon vozidla, který je zprostředkován elektromotorem.

**Trakční napájecí stanice (TNS)** – seskupení strojů a přístrojů, obvykle v samostatné budově, které má za úkol transformovat energii (velikost napětí, popřípadě i frekvenci) z distribuční sítě a napájet trakční vedení.

**Transformovna** – napájecí stanice pro střídavé systémy, v ČR 25 kV / 50 Hz.

**Měnič** – napájecí stanice pro stejnosměrné systémy, v ČR majoritně 3 kV.

**Trakční vedení** – slouží k rozvodu a předávce elektrické energie lokomotivě.

**Spínací stanice** – zařízení sloužící ke spínání a rozpínání rozdělených úseků trolejí. Slouží k maximalizaci využití vodivého průřezu trolejí.

**Zpětné vedení** – sloužící k uzavření obvodu od vozidla zpět k trakční napájecí stanici.

**Trolej** – vedení sloužící k bezprostřední předávce elektrické energie lokomotivě. Slouží také k přenosu elektrické energie.

**Grafikon** – nákresný jízdní řád, z grafikonu lze vyčíst polohu pro sledovaný čas a rychlost vlaku na trati.

**Hala THU** – hala technickohygienické údržby. Hala sloužící k běžné údržbě a očištění vagonů a k jejich předtápění.

**Bludný proud** – proud protékající zemí. Má různou velikost a směr.

## 2.1 Proudové trakční soustavy

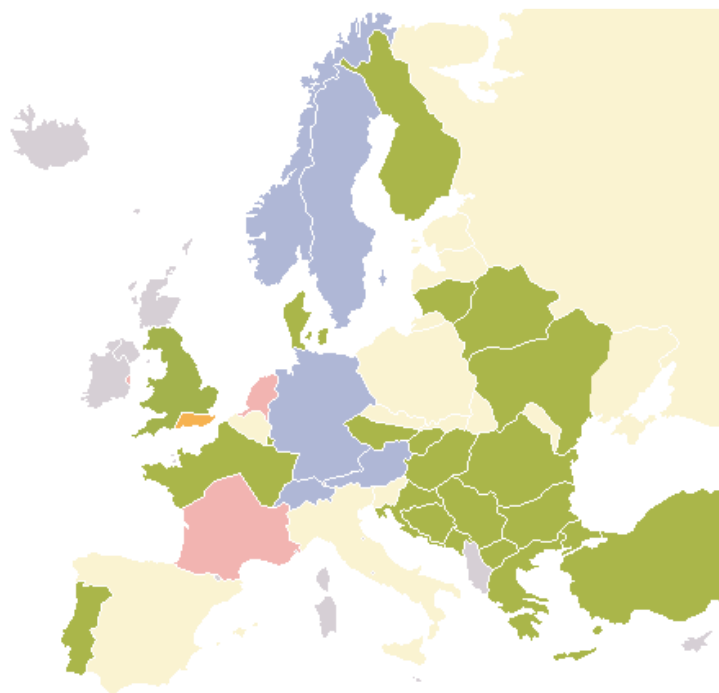
Historický vývoj dal na území Evropy vzniknout hned několika, dnes používaným, systémům napájení železničních tratí. Zavádění jednotlivých napájecích systémů do provozu bylo podmíněno vyspělostí techniky v době výstavby. Při rozšiřování elektrifikovaných tratí je pak, z ohledu na přechodnost lokomotiv, výhodné setrvávat v systému stávajícím. [1] [2] [4]

Společně s technickým vývojem, především pak zdokonalováním výkonové elektroniky, přišly nové, technicky odlišné, proudové soustavy. Tyto soustavy přinášely snížení nákladů na provoz i výstavbu a přinesly i zdokonalení samotné trakce. Tyto důvody pak přiměly některé země (např. Francie, Anglie, ČR) pro zavádění druhé proudové soustavy, jiné pak šly cestou úplné přestavby napájecího systému na železnici při její generální opravě (např. Holandsko). [1] [2] [4]

Na území Evropy jsou dnes na železnicích provozovány následující proudové soustavy:

- stejnosměrné (3 kV, 1,5 kV, v menší míře 750 V)
- střídavé se sníženým kmitočtem (15 kV /  $16\frac{1}{3}$  Hz)
- střídavé s průmyslovým kmitočtem (25 kV / 50 Hz)

750 V ss
  15 kV,  $16\frac{1}{3}$  Hz
  3 kV ss
  1,5 kV ss
  25 kV, 50 Hz
  neelektrizováno



Obr. 2 – Používané trakční proudové soustavy na železnicích v Evropě [18]

### 2.1.1 Stejnosměrné trakční proudové soustavy

Stejnosměrné trakční proudové soustavy jsou napájené z trakčních měničů. Trakční měnírný jsou napájeny z distribučních sítí a usměrňují napětí. Nevýhodou stejnosměrných trakčních soustav je určité navýšení investičních nákladů, oproti soustavám střídavým, a hlavně korozivní účinek zpětných proudů. Mezi hlavní výhody těchto soustav pak patří symetrický odběr energie z distribuční sítě a vysoký účinník. [1] [2] [4]

Na provoz železničních tratí se z důvodů velkých výkonů a s tím spojeným úbytkem napětí volí co největší napětí. Oproti tomu jsou z důvodu bezpečnosti na tratích MHD voleny napětí nižší. [1] [2] [4]

Jmenovitá napětí stejnosměrných soustav:

- 250 V - důlní dráhy hlubinných dolů
- 600 V - dráhy tramvajové a trolejbusové
- 750 V - metro
- 1500 V - hlavní a vedlejší železniční tratě a průmyslové dráhy
- 3000 V - hlavní železniční tratě

### 2.1.2 Střídavé trakční proudové soustavy

Střídavé trakční proudové soustavy jsou napájené z trakčních transformoven, které jsou připojeny k distribuční síti. Prvotnímu rozšíření střídavých proudových soustav bránilo technické řešení lokomotiv. V dnešní době jsou ale tyto problémy vyřešeny, přičemž mezi hlavní výhody těchto soustav, oproti stejnosměrným, patří nižší investiční náklady na elektrifikaci drah a zanedbatelný vliv zpětných proudů na úložná zařízení, z hlediska elektrochemické koroze. Mezi další výhodou pak lze

zařadit snížení úbytků napětí vlivem vyššího napájecího napětí. Z hlavních nevýhod lze vyčíst nesymetrický odběr energie z trojfázové sítě, ovlivnění distribuční sítě vyššími harmonickými a nižší účinník. [1]

Jmenovitá napětí jednofázových trakčních proudových soustav průmyslového kmitočtu 50 Hz jsou:

- 25, 50 kV - hlavní železniční tratě
- 6, 10 kV - průmyslové tratě
- 0,4 kV - hlubinné doly

### **2.1.3 Trakční proudové soustavy na železnici v ČR**

Česká republika provozuje na svých tratích celkem čtyři proudové soustavy (úplná mapa je v příloze 1). Trakční proudové soustavy provozovány v ČR jsou:

- stejnosměrné 1,5 kV
- stejnosměrné 3 kV
- střídavé se sníženým kmitočtem 15 kV /  $16\frac{1}{3}$  Hz
- střídavé s průmyslovým kmitočtem 25 kV / 50 Hz

Stejnosemerná soustava 1,5 kV je u nás, na hlavní železniční trati, provozována pouze na naší první elektrizované trati mezi Tábořem a Bechyní. Střídavá soustava 15 kV je pak provozována pouze v malém rozsahu na jižní Moravě, přičemž je napojená přímo na Rakouskou železniční síť. [1]

Mezi dominantní proudové soustavy u nás patří soustava stejnosměrná 3 kV a soustava střídavá 25 kV. Koexistence dvou rozdílných dominantních systémů je dána především dobou výstavby daného systému a technickým vývojem dané doby. Elektrizace stejnosměrnou soustavou 3 kV byla u nás zahájena již v počátcích 50-tých let minulého století. Další proudová soustava, 25 kV, se u nás začala zavádět již v dalším desetiletí. Ačkoli se vyšší napájecí napětí pro provoz tratí jevílo výhodnější, vzhledem k značné rozpracovanosti prvního systému, a plánům k dalšímu rozšiřování elektrizace, bylo rozhodnuto o souběžné existenci dvou různých napájecích systémů. V současné době není možné přejít na jednotný systém napájení. Tento problém se řeší provozováním vícesystémových lokomotiv (např. Škoda 380). [1]

## **2.2 Způsoby napájení trakčních sítí**

Rozdělení jednotlivých úseků a jejich spojování pomocí spínačů se provádí z důvodů snadné lokalizace poruch a maximálního využití průřezu trakčního vedení. [1] [2]

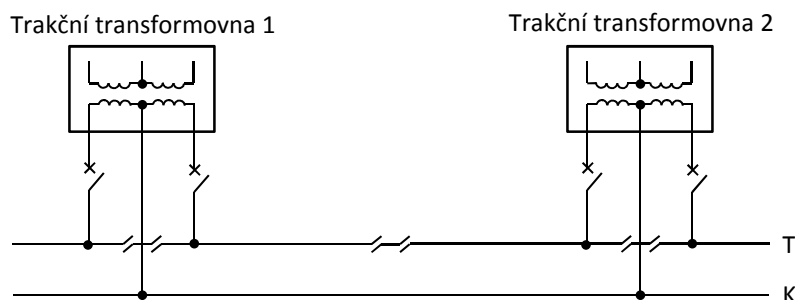
Podle způsobu napájení jednotlivých úseků tratí rozlišujeme:

- jednostranné napájení trakčních úseků
- dvoustranné napájení trakční sítě
- čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě

### **2.2.1 Jednostranné napájení trakčních úseků**

Jednostranné napájení se provozuje dvojího druhu. U městských drah se používá napájení soustředné, kdy z jedné napájecí stanice je paprskovitě rozveden proud do několika napájených úseků tratě. [1] [2]

Druhý způsob je napájení rozložené. Tento způsob je využíván u železnice, kdy jedna napájecí stanice napájí pouze dva sousední úseky tratě. Takto jsou u nás napájeny veškeré střídavé tratě (Obr. 3). [1] [2]



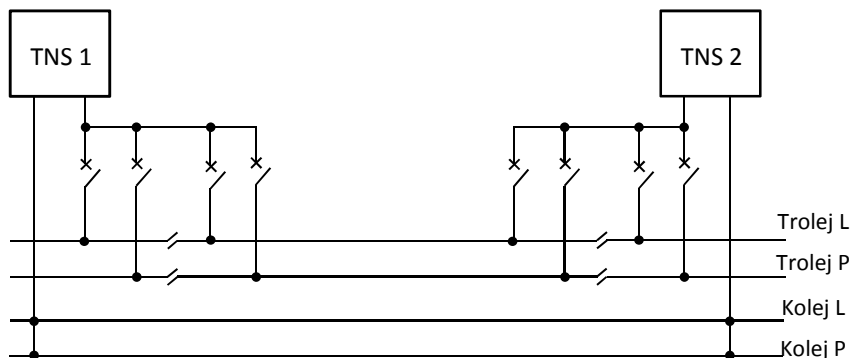
Obr. 3 – Rozložené, jednostranné napájení železnice (střídavá síť)

Výhodou jednostranného napájení je snadná a spolehlivá lokalizace poruch a přehlednost proudových cest. [1] [2]

### 2.2.2 Dvoustranné napájení trakční sítě

U dvoustranného napájení je jeden úsek napájen ze dvou protilehlých napájecích stanic. Tímto způsobem je možné prodloužit délku napájených úseků až na dvounásobek délky, oproti napájení jednostrannému, přičemž kvalitativně zůstane napájení rovnocenné. S výhodou se napájecí stanice umísťují v blízkosti úsekových dělení, čímž se zkrátí napájecí vedení. [1] [2]

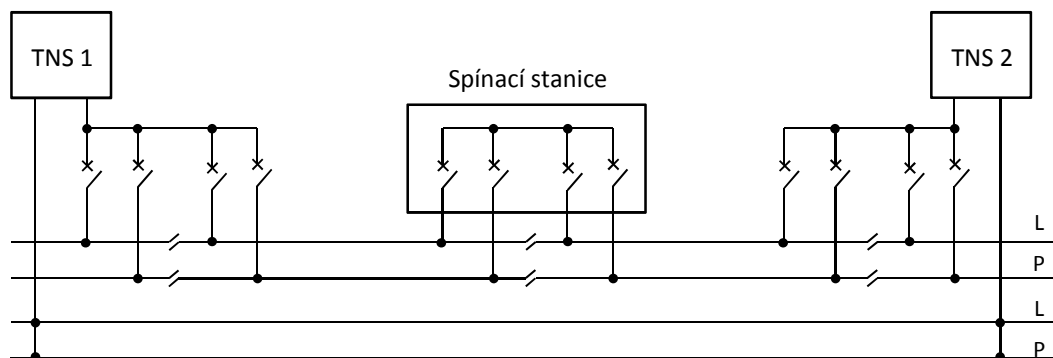
Pro zachování možnosti výlukového provozu se u dvukolejných tratí napájí zvlášť levá a pravá trolej. Nevýhoda dvoustranného napájení je nutnost, při poruchách, odepnout úsek z obou stran. [1] [2]



Obr. 4 – Rozložené, dvoustranné napájení dvukolejné tratě

### 2.2.3 Čtyřstranné napájení dvukolejné tratě

Čtyřstranné napájení dvukolejné tratě vznikne podélným rozdělením uprostřed napájeného úseku a přemostěním dělicího místa čtyřmi směrovými spínači, kdy spínače, společně se sběrníci, tvoří spínací stanici. Výhodou tohoto zapojení je maximální proudová využitelnost vedení a možnost vypnout jen část vedení při poruše. [1] [2]



Obr. 5 – Rozložené, čtyřstranné napájení dvoukolejné tratě se spínací stanicí

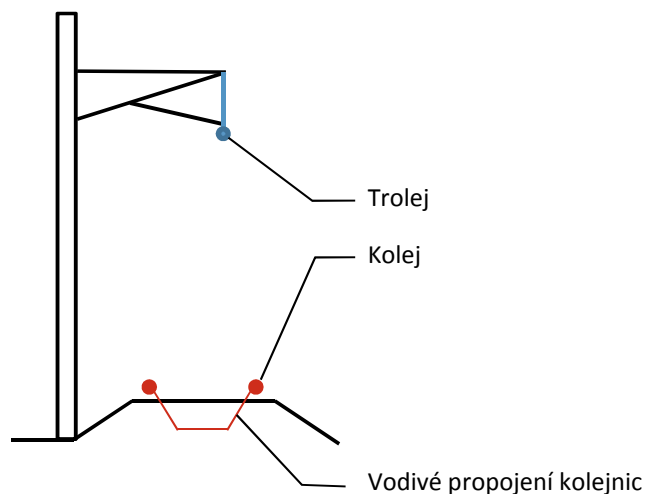
## 2.3 Zpětné vedení

Zpětné vedení slouží k uzavření trakčního obvodu od místa odběru energie (od lokomotivy) zpět k trakční napájecí stanici. Podle proudové cesty je můžeme rozdělit:

- zpětné vedení kolejnicí
- zpětné vedení kolejnicí a zemí
- zpětné vedení zpětným lanem

### 2.3.1 Zpětné vedení kolejnicí

Zpětné vedení izolovanou kolejnicí se provádí převážně na tratích elektrizovaných stejnosměrnou proudovou soustavou, z důvodu zamezení vzniku zemních proudů.

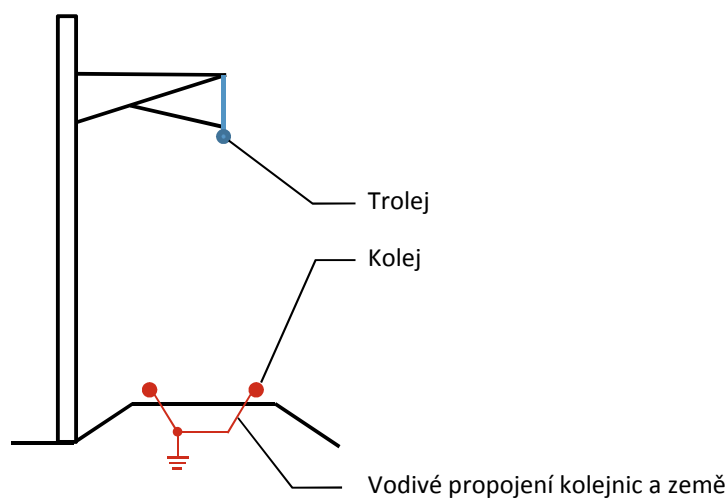


Obr. 6 – Zpětné vedení kolejnicí

### 2.3.2 Zpětné vedení kolejnicí a zemí

Zpětné vedení uzemněnou kolejnicí je realizováno výhradně u tratí elektrizovaných střídavou proudovou soustavou. U střídavé trakce probíhá elektrochemická koroze, vlivem účinků bludných proudů, pouze v zanedbatelné míře. Jelikož je kolejnice z feromagnetických materiálů, projevuje se

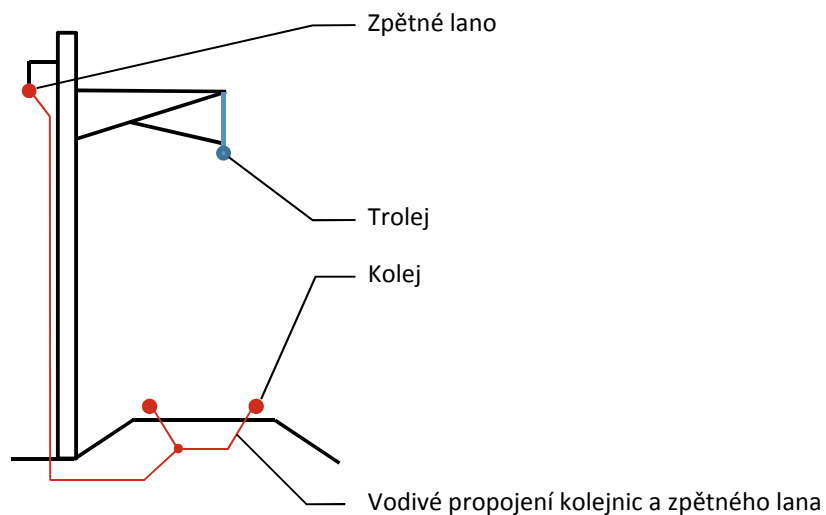
zde zvýšení impedance kolejnice vlivem induktivní reaktance a skin efektu. Průběžné uzemňování kolejnic zvyšuje vodivý průřez zpětné cesty a má za následek snížení impedance.



Obr. 7 – Zpětné vedení kolejnicí a zemí

### 2.3.3 vedení zpětným lanem

Zpětné lano slouží k posílení zpětné cesty. U střídavé soustavy má zpětné lano zavěšené v blízkosti troleje značný vliv na snížení induktivní reaktance vlivem zmenšení smyčky trolej - zpětná cesta a tím snížení její impedance. Toto řešení má ale nepříznivý vliv na zabezpečovací zařízení na trati.



Obr. 8 – Zpětné vedení zpětným lanem

### 3. Specifické problémy provozování stejnosměrné elektrické trakce

Vlivem nedokonalé vodivosti trakčního obvodu vzniká provozem elektrické trakce řada technických a ekonomických problémů. U stejnosměrné trakce jsou tyto problémy, oproti trakcím střídavým, ovlivněny převážně nutností napájení trakcí velkými proudy, z důvodu relativně malých napájecích napětí.

Tyto problémy lze rozdělit do dvou skupin:

- problémy přímo spojené s úbytky napětí
- parazitní cesty zpětného proudu a elektrochemická koroze, která je charakterizovaná bludnými proudy

#### 3.1 Úbytky napětí v trakčním obvodu

Úbytek napětí v trakčním obvodu vzniká vlivem průtoku proudu přes nedokonalé elektrovedné cesty. Vyplynající problémy pak bývají rázu ekonomického, technického, v krajních případech i bezpečnostního.

##### 3.1.1 Odvození úbytku napětí v ustáleném stavu

Úbytek napětí je vyvolán průchodem proudu vedením, které má nenulovou impedanci:

$$\overline{\Delta U} = \overline{Z} \cdot \overline{I} \quad (3.1)$$

Z toho po odvození:

$$\Delta U = R \cdot I_c + X \cdot I_j = RI \cdot \cos\varphi + XI \cdot \sin\varphi \quad (3.2)$$

Při uvažování stejnosměrné sítě pak platí:

$$\Delta U = R \cdot I \quad (3.3)$$

Kde:	$\Delta U$	úbytek napětí [V]
	$R$	činný odpor na úseku výpočtu úbytku [ $\Omega$ ]
	$I$	proud protékající odporem $R$ [A]

Dále při výpočtu budeme uvažovat konstantní odběr výkonu, tedy:

$$P_V = \text{konst.} \quad (3.4)$$

$$I_V = f(U_V) \quad (3.5)$$

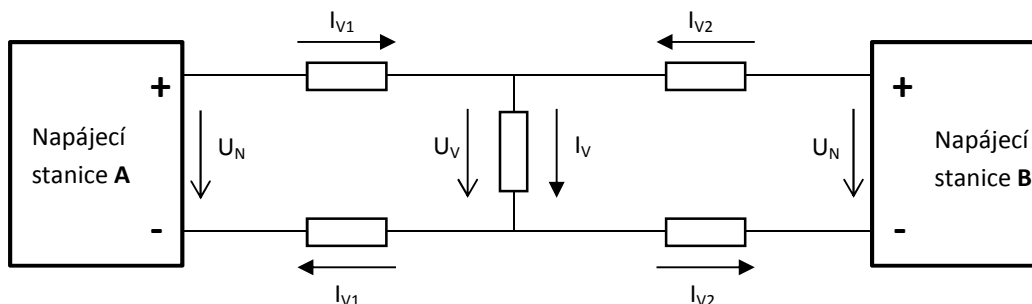
Potom:

$$I_V = \frac{P_V}{U_V} \quad (3.6)$$

Kde:	$I_V$	proud odebíraný vlakem [A]
	$P_V$	výkon odebíraný vlakem [W]

$U_V$       napětí na sběrači vlaku [V]

Pozn.: Přesnějšího výpočtu bychom dosáhli, pokud bychom uvažovali s konstantním momentem trakčního motoru vlaku. Zde bychom ale museli dosadit na trať konkrétní vlaky a museli bychom dokonale znát jejich pohony.



Obr. 9 – Zjednodušené schéma pro určení průtoku proudů k jednotlivým vlakům

$$I_V = I_{V1} + I_{V2} \quad (3.7)$$

$$U_V = U_N - \Delta U_V \quad (3.8)$$

Kde:  $I_{V1}$       proud tekoucí k vlaku od měničny A [A]

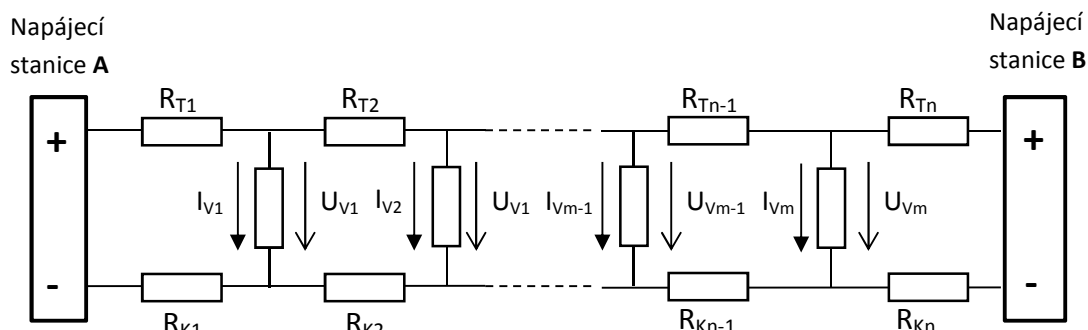
$I_{V2}$       proud tekoucí k vlaku od měničny B [A]

$U_N$       napětí na měčíně [V]

$\Delta U_V$       úbytek napětí v místě odběru vlaku [V]

Dále si trať rozdělíme na jednotlivé dílčí úseky, přičemž trať dělíme v místech, kde předpokládáme odběr (tam, kde se nachází vlak, popřípadě můžeme zahrnout i jiné odběry na nádražích a v depech), nebo změnu odporu (např. přechodové odpory, nebo změna průřezu nebo materiálu vedení).

Pro výpočet úbytku napětí na i-tém úseku tratě pak platí:



Obr. 10 – Schéma rozdělení jednotlivých úseků tratě, při jíždě více vlaků na trati



$$\Delta U_i = R_i \cdot \sum_{j=1}^m I_{vij} \quad (3.10)$$

Po dosazení za  $I_{vij}$ :

$$\Delta U_i = R_i \cdot \sum_{j=1}^m \frac{P_{ij}}{U_N - \Delta U_{vj}} \quad (3.10)$$

Kde:  $\Delta U_i$  úbytek napětí na určeném úseku tratě [V]  
 $R_i$  odpor daného úseku tratě [ $\Omega$ ]  
 $I_{vij}$  příspěvek proudu j-tého vlaku na i-tém úseku [I]  
 $P_{ij}$  příspěvek výkonu j-tého vlaku na i-tém úseku [I]  
 $\Delta U_{vj}$  úbytek napětí v místě odběru j-tého vlaku [V]

Námi hledaný úbytek napětí (vždy vztaženo k určitému místu na trati) pak spočteme jako součet všech dílčích úbytků napětí, od místa napájecí stanice, k místu určení úbytku.

### Metoda výpočtu při uvažování jednoho vlaku na trati

Při uvažování jednoho vlaku na trati a počítání úbytku napětí v místě odběru můžeme napsat:

$$\Delta U = R \cdot \frac{P_V}{U_N - \Delta U} \quad (3.11)$$

Z toho nám vyjde kvadratická rovnice:

$$\Delta U^2 - \Delta U \cdot U_N + P_V \cdot R = 0 \quad (3.12)$$

Kde:  $\Delta U$  úbytek napětí v místě odběru vlaku [V]  
 $U_N$  napájecí napětí tratě [V]  
 $P_V$  výkon odebíraný vlakem [W]  
 $R$  odpor mezi vlakem a napájecím místem tratě [ $\Omega$ ]

Přičemž platí:

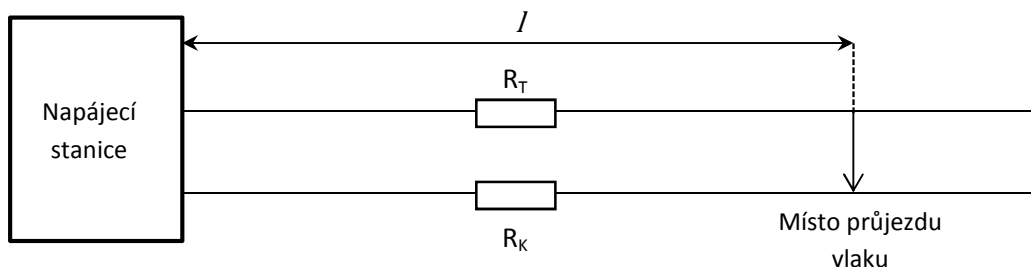
$$\Delta U = \Delta U_T + \Delta U_K \quad (3.13)$$

$$\frac{\Delta U_T}{\Delta U_K} = \frac{R_T}{R_K} \quad (3.14)$$

Kde:  $\Delta U_T$  úbytek napětí na troleji [V]  
 $\Delta U_K$  úbytek napětí na koleji [V]

$R_T$  odpor troleje [ $\Omega$ ]  
 $R_K$  odpor kolejnic [ $\Omega$ ]

Pokud je trať napájena z jedné strany, spočteme odpor  $R$  následovně:

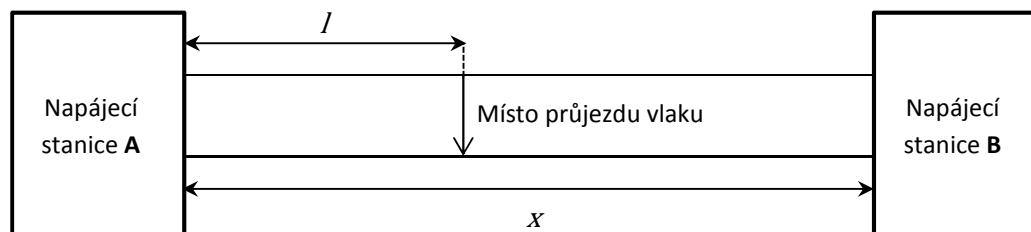


Obr. 11 – Vzdálenost vlaku od napájecí stanice

$$R = l \cdot (r_T + r_K) \quad (3.15)$$

Kde:  $R$  odpor mezi vlakem a napájecím místem trati [ $\Omega$ ]  
 $l$  vzdálenost vlaku od napájecí stanice [km]  
 $r_T$  odpor troleje na 1 km [ $\Omega/\text{km}$ ]  
 $r_K$  odpor zpětné cesty na 1 km [ $\Omega/\text{km}$ ]

Při napájení trati ze dvou stran pak spočteme odpor  $R$  následovně:



Obr. 12 – Vzdálenost vlaku mezi napájecími stanicemi

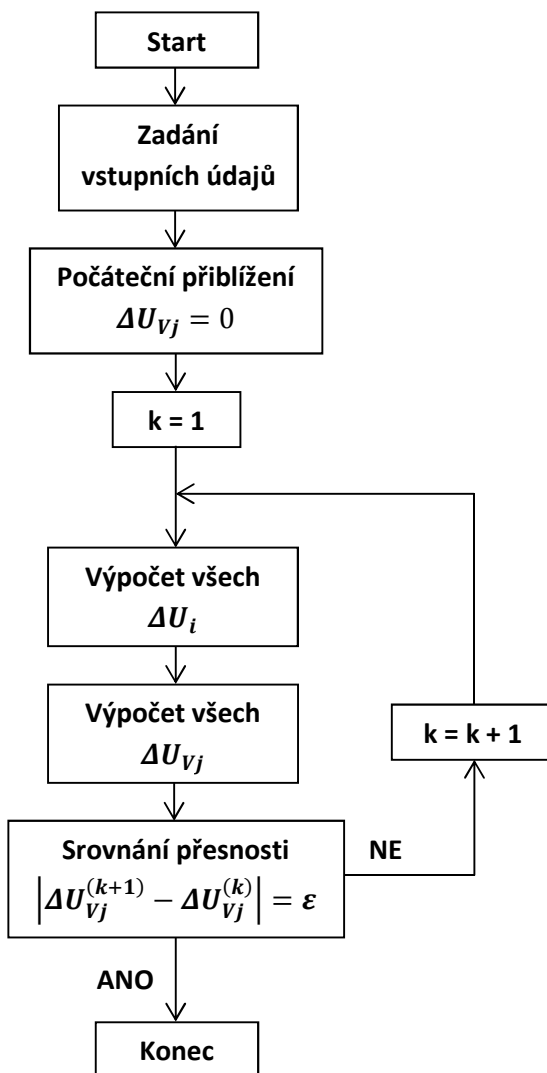
$$R = \frac{l \cdot (x - l)}{x} \cdot (r_T + r_K) \quad (3.16)$$

Kde:  $x$  vzdálenost napájecích stanic [km]

### Metoda výpočtu při uvažování více vlaků na trati

Máme-li  $m$  vlaků (odběrů) na trati, pak nám po dosazení do vzorce 3.10 (určování dílčích úbytků napětí) vyjde v jedné rovnici  $m + 1$  neznámých (jako neznámou uvažujeme počítaný úbytek napětí a napětí u každého vlaku).

Zadaný výpočet lze jednoduše provést pomocí metody postupného zpřesňování výsledku. Tato metoda spočívá v prvotním odhadnutí napětí u každého vlaku (respektive úbytků napětí u vlaků), čímž nám vznikne rovnice o jedné neznámé. Tímto způsobem spočteme všechny dílčí úbytky napětí na trati a z nich určíme přesnější úbytky u jednotlivých vlaků, které zpětně dosadíme do původní rovnice. Výpočet pak končí, pokud námi zadaná přesnost odpovídá vypočtené přesnosti. Algoritmus výpočtu je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 13 – Algoritmus výpočtu úbytků napětí metodou postupného zpřesňování výsledku

Experimentálně bylo zjištěno, že při zadání počátečního přiblížení (velikosti úbytků napětí při jednotlivých vlacích) rovno nule, nám pro zachování dostatečné přesnosti výpočtu na standardní trati stačí méně než 5 kroků výpočtu.

Námi hledaný úbytek napětí pak spočteme jako součet všech dílčích úbytků napětí, od místa napájecí stanice, k místu určení úbytku.

### 3.1.2 Modelový výpočet úbytku napětí v trakčním obvodu

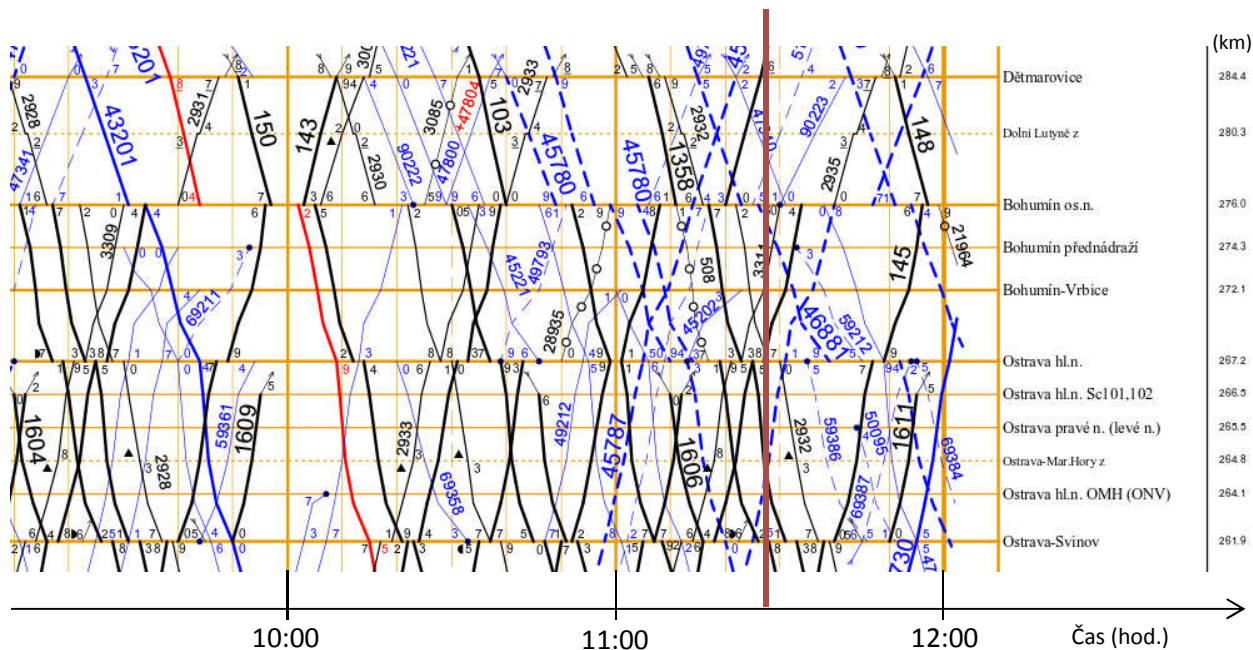
Pro modelový výpočet jsem zvolil výpočet úbytku napětí ve vlakové stanici Bohumín. Náskres polohy stanice i s nejbližšími napájecími stanicemi je na následujícím obrázku. Pro výpočet uvažuji napájení daného místa pouze napájecími stanicemi Ostrava Svinov a Dětmárovice, dvou kolejnou trať po celé délce mezi oběma napájecími stanicemi a dvoustranné napájení jednotlivých trolejí, přičemž jednotlivé troleje nejsou vodivě spojeny.



Obr. 14 – Rozmístění spínacích stanic a trakčních měření v okolí vlakové stanice Bohumín [16]

### Určení rozmístění vlaků na trati a jejich výkonů

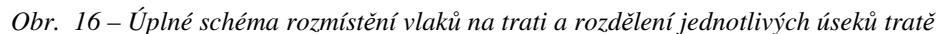
Určení rozmístění vlaků na trati bylo provedeno pomocí grafikonu dané tratě. Grafikon vychází z jízdního řádu pro rok 2014. Konkrétní časový údaj je sledován v 11:30.



Obr. 15 – Grafikon tratě [17]

Tab. 1– Tabulka rozmístění vlaků na trati a jejich výkonů

Úplné náhradní schéma tratě je na následujícím obrázku:



Odpozem trakčního obvodu myslíme odpor v trakčním vedení, který se skládá z paralelního spojení troleje, nosného lana, popřípadě i zesilujícího vedení, a odpor ve zpětné cestě, kde počítáme paralelní spojení všech kolejnic na trase.

Odpor na 1 km délky spočteme jako:

$$r = \rho / S \quad (3.17)$$

Potom:

$$R = r \cdot l \quad (3.18)$$

Kde:  $r$  odpor na 1 km [ $\Omega/\text{km}$ ]  
 $\rho$  rezistivita [ $\Omega \cdot \text{km}/\text{mm}^2$ ]  
 $S$  vodivý průřez [ $\text{mm}^2$ ]  
 $R$  odpor úseku [ $\Omega$ ]  
 $l$  délka úseku [km]

Pro výpočet budeme uvažovat trolejové vedení, které je sestaveno z paralelní kombinace trolejového drátu a nosného lana a čtyři paralelní kolejnice, jako zpětné vedení.

Trolejové vedení pro koridorové stejnosměrné tratě se používá:

- Trolej – 150 mm<sup>2</sup> Cu
- Nosné lano – 120 mm<sup>2</sup> Cu
- Popřípadě zesilující vedení lanem Al-Fe, s nímž v modelovém příkladu nebudeme počítat

Pro zpětnou cestu pak budeme uvažovat s kolejnicemi typu UCI 60. Elektrické parametry těchto prvků jsou v tabulce 2. Uvedené údaje odpovídají tabulkovým, běžně uváděným, údajům.

Tab. 2 – Zadané parametry pro výpočet odporů trakčního obvodu

Trolej		Nosné lano		Kolejnice		
typ	nejvyšší dovolený odpor ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	typ	nejvyšší dovolený odpor ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	typ	průřez $S$ (mm <sup>2</sup> )	rezistivita $\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )
150 mm <sup>2</sup> Cu	0,1195	120 mm <sup>2</sup> Cu	0,15	UCI 60	7686	0,243

Po výpočtu paralelní kombinace troleje a nosného lana nám vyjde odpor trolejového vedení:

$$r_T = 66,51 \text{ m}\Omega \cdot \text{km}^{-1} \quad (3.19)$$

Po dosazení do vzorce 3.17 a spočtení paralelní cesty čtyř kolejnic vyjde odpor zpětné cesty:

$$r_K = 7,905 \text{ m}\Omega \cdot \text{km}^{-1} \quad (3.20)$$

Výpočty odporů na dílčích úsecích trakčního obvodu jsou v příloze 2.

Při počítání odporu zpětné cesty se dopouštíme následujících zjednodušení:

- neuvažujeme svod mezi kolejnicí a zemí, který odpor zpětné cesty snižuje
- neuvažujeme navýšení odporu zpětné cesty vlivem příčného spojování kolejnic (tímto se odpor může navýšit až o 10 %)

## Výpočet úbytků napětí

Výpočet provedeme dle metodiky popsané výše. Metoda spočívá v prvotním zadání úbytku napětí u jednotlivých vlaků, spočtení dílčích úbytků napětí na jednotlivých úsecích tratě, pomocí níž spočteme nové, přesnější, úbytky napětí u vlaků. V dalších krocích výpočet opakujeme, dokud nedosáhneme požadované přesnosti. Bylo provedeno celkem 5 kroků výpočtu, přičemž dostatečné přesnosti jsme schopni dosáhnout již při třetím kroku výpočtu.

Výsledky výpočtů jsou v následující tabulce a grafech. Úplný výpočet je v příloze 2.

Tab. 3 – Výsledné úbytky napětí ve vlakové stanici Bohumín

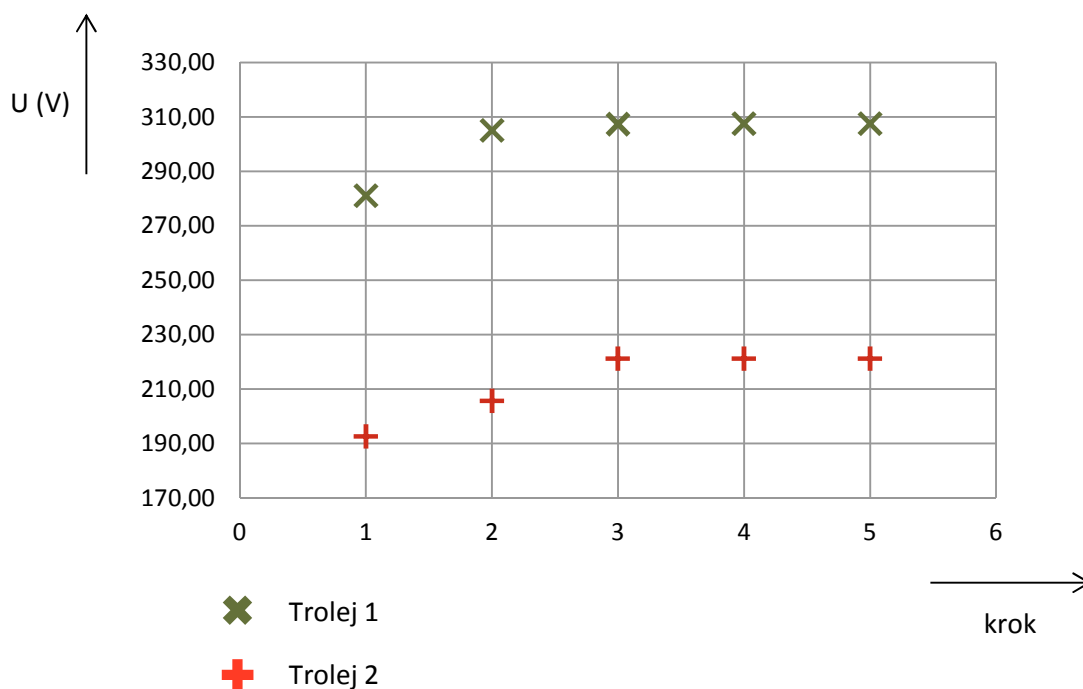
Úbytky napětí na troleji 1 ve směru Ostrava Svinov – Dětmárovice po jednotlivých krocích výpočtu: (V)				
krok 1	krok 2	krok 3	krok 4	krok 5
281,04	305,08	307,32	307,53	307,55

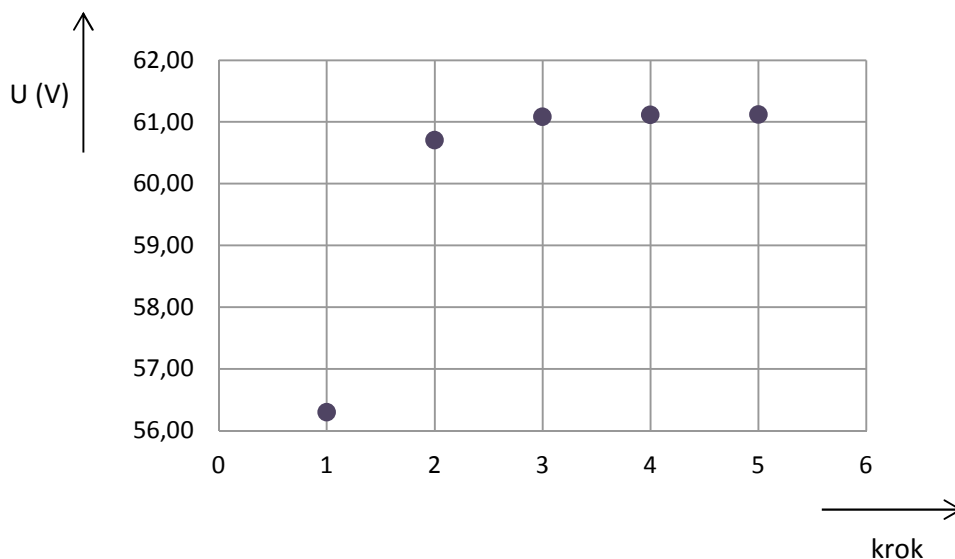
Úbytky napětí na troleji 2 ve směru Dětmárovice – Ostrava Svinov po jednotlivých krocích výpočtu: (V)				
krok 1	krok 2	krok 3	krok 4	krok 5
192,66	205,67	221,20	221,27	221,27

Úbytky napětí na koleji po jednotlivých krocích výpočtu: (V)				
krok 1	krok 2	krok 3	krok 4	krok 5
56,30	60,70	61,08	61,11	61,12



Obr. 17 – Graf úbytků napětí na trolejích po jednotlivých krocích výpočtu



Obr. 18 – Graf úbytků napětí na kolejnicích po jednotlivých krocích výpočtu

### 3.1.3 Nepříznivé vlivy charakterizované úbytkem napětí

#### Zvýšení nákladů

Rozeznáváme dva druhy zvýšení nákladů v důsledku úbytku napětí:

- investiční náklady
- náklady na ztráty

Investičními náklady rozumíme pořizovací náklady. Jejich zvýšení, vlivem úbytků napětí, je zapříčiněno nutností stavby vedení větších průřezů a výkonnějších napájecích stanic z důvodu snížení provozních ztrát.

Náklady na ztráty pak jsou způsobeny provozem, kdy při průtoku proudů vznikají ve vedení výkonové ztráty, které je nutné pokrýt zvýšenou dodávkou výkonu od trakčních měničů.

Ztráty na vedení spočteme:

$$\Delta P = \frac{\Delta U^2}{R} \quad (3.21)$$

Celkové roční náklady na vedení určíme:

$$\sum N = N_i + N_{\Delta} \quad (3.22)$$

Kde:  $\sum N$  celkové roční náklady  
 $N_i$  náklady na investice  
 $N_{\Delta}$  náklady na ztráty

Přičemž:

$$N_i = K_i \cdot (p \cdot 10^{-2}) \quad (3.23)$$



$$N_{\Delta} = \Delta P_T \cdot (C_p + C_w \cdot T_{\Delta}) \quad (3.24)$$

Kde:  $K_i$  cena vedení  
 $p$  roční odpisy v %  
 $\Delta P_T$  roční ztráty výkonu na vedení  
 $C_p$  cena ztrátového výkonu  
 $C_w \cdot T_{\Delta}$  cena ztracené elektrické energie

Po dosazení pak celkové roční náklady na vedení:

$$\sum N = K_i \cdot (p \cdot 10^{-2}) + \Delta P_T \cdot (C_p + C_w \cdot T_{\Delta}) \quad (3.25)$$

### Nepříznivé vlivy technického rázu

Do této kategorie patří vlivy způsobené stálým potenciálem mezi kolejnicemi a vodivými uzemněnými konstrukcemi, popřípadě zemí obecně. Jmenovitě lze vyjmenovat následující:

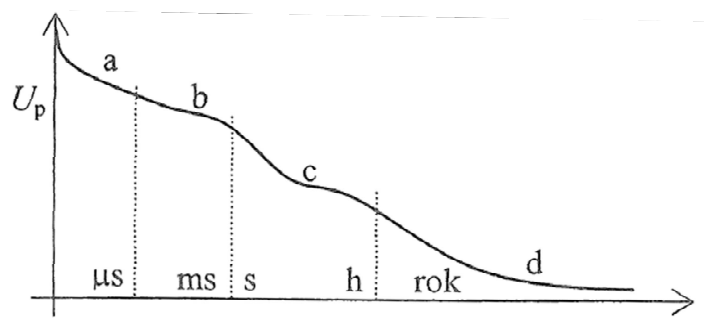
- vznik nebezpečného dotykového napětí
- jiskření při náhodném dotyku kolejnice s uzemněnou konstrukcí
- stárnutí izolace a elektrický průraz

Z důvodu nemožnosti vodivého spojení kolejnic se zemí, pro zamezení vzniku bludných proudů, se mezi kolejnicemi a uzemněnými konstrukcemi objevují napětí, která mohou být velikostně blízká úbytkům napětí na zpětné cestě. Podle předcházejícího výpočtu by toto napětí při běžném provozu nemělo překročit normou stanovené dotykové napětí (pro prostory dílen, a jím podobných, tuto hodnotu při dlouhodobém trvání těsně nesplňuje). Není však vyloučeno, že tuto mez krátkodobě překročí při náhlém zvýšení odběru (například při současném rozjezdu více vlaků).

Dalším velice často pozorovaným jevem, způsobeným nenulovým potenciálem mezi kolejnicemi a uzemněnými konstrukcemi, je jiskření při jejich náhodném dotyku. Jiskrový výboj vznikne průrazem vzduchu při vzájemném přiblížení elektrod různých potenciálů pod mez dielektrické pevnosti vzduchu.

Za normálních podmínek není jiskření nijak zvlášť nebezpečné, způsobuje však jistou nekomfortnost obsluhy a určité rozrušování struktury materiálu v těsné blízkosti výboje (typicky narušení ochranných nátěrů a koroze v daném místě). Nebezpečí hrozí při manipulaci s výbušnými a snadno zápalnými látkami.

K nejvýznamnějším problémům patří vznik bludných proudů z důvodu elektrického proražení izolačních podložek pod kolejnicemi vlivem působení zvýšeného napětí, nebo stárnutí izolace. Na následujícím obrázku je znázorněna závislost průrazného napětí na době selhání pevné izolace, s ohledem na mechanismy průrazu.



Obr. 19 – Závislost průrazného napětí na čase [3]

Oblast **a**, trvající v řádech mikrosekund, odpovídá čistě elektrickému průrazu. Oblast **b** je přechodná oblast. Tepelný průraz odpovídá oblastí **c** a oblast **d** představuje stárnutí izolace. [3]

Stárnutí izolace je způsobeno chemickými, fyzikálními, tepelnými a mechanickými změnami, které vyústí ve snížení dielektrické pevnosti izolantu a následujícímu průrazu. Na železnici patří k nejčastěji zastoupeným mechanismům stárnutí izolačních podložek pod kolejnicemi vznik mikrotrhin a deformací, způsobený tlakem a pnutím od projíždějících vlakových souprav. V trhlinách a dutinách pak mohou vznikat částečné výboje, které urychlují stárnutí izolace. Nezanedbatelný vliv na životnost izolace má také její vlhnutí, kdy voda snižuje vodivost izolace a procházející proud pak přispívá k jejímu oteplování. [3]

## 3.2 Bludné proudy

Bludný proud je název pro elektrický proud, který protéká zemí a mění směr a svoji velikost, přičemž mohou vznikat jak přirozeně, tak uměle průmyslovou činností. Zatímco jsou přirozené bludné proudy, jimž říkáme zemské proudy nebo telurické proudy, velikostně malé, až zanedbatelné, bludným proudům vyvolaným průmyslovou činností již musíme věnovat určitou pozornost. [2] [9]

### 3.2.1 Původ bludných proudů

Z hlediska původu si můžeme bludné proudy rozdělit do dvou skupin: [2] [9]

- přirozené zemní proudy (telurické proudy)
- bludné proudy způsobené průmyslovou činností

#### Přirozené zemní proudy

Mechanismů vzniku telurických proudů známe několik. V prvním případě je to vznik proudu elektrochemickou aktivitou ložisek kovových rud, grafitu, pyritu, nebo uhlí, tedy vzniku galvanických článků jejich oxidací. Tyto proudy jsou však velmi malé a jejich šíření nepřekračuje vzdálenosti v řádech stovek metrů. [2] [9]

Další příčinou vzniku telurických proudů jsou indukční jevy v zemském magnetickém poli. Magnetické pole Země lze rozdělit na vnitřní, také nazýváme permanentní, a vnější, dynamické. Vnitřní magnetické pole podléhá jen pomalým změnám, které jsou pravděpodobně zapříčiněny hydrodynamickými pohyby uvnitř Země. Příčinou změny vnějšího magnetického pole pak jsou elektrické proudy ve vysokých vrstvách atmosféry a dále, tedy příčiny vně zemského tělesa. [2] [9]

Proud ve vodiči se indukuje v prostředí změny magnetického pole, to nastává například tehdy, protéká-li velké množství vody přes zemské magnetické pole. Tento jev lze pozorovat v okolí

mořských kanálů a průlivů při přílivu, respektive odlivu. Tyto proudy jsou však, v porovnání s bludnými proudy vyvolanými průmyslovou činností, zanedbatelné. [2] [9]

Na změny v magnetickém poli Země má též vliv Slunce. Od Slunce směrem k Zemi proudí stálý proud částic, který má za následek zhušťování magnetických siločar ze strany Slunce a jejich protahování na opačné straně Země. Dojde-li k náhlému uvolnění většího množství energie od Slunce (erupce), může tento sluneční vítr dosáhnout až k magnetosféře Země a tím vyvolat vznik zemských proudů, v důsledku změny magnetického pole Země. [2] [9]

### **Zemní proudy způsobené průmyslovou činností**

Rozlišujeme dva druhy původu bludných proudů, způsobené průmyslovou činností. Střídavé bludné proudy vznikají v okolí uzemněných nulových vodičů třífázových soustav, vlivem průtoku vyrovnávacího proudu nesymetrické zátěže, nebo při zkratech v okolí zemničů. Dále pak mohou vznikat v okolí železnic, elektrizovaných střídavým systémem. [2] [9]

Stejnoseměrné bludné proudy vznikají nejčastěji v okolí železniční sítě, elektrizované stejnosměrným systémem. Ve větší míře se dále vyskytují ve městech v důsledku úniků proudu od městských drah (tramvaje) nebo metra. [2] [9]

### **3.2.2 Šíření bludných proudů**

Bludné proudy se šíří celou zasaženou oblastí, v podobě proudového stacionárního pole, a jejich šíření je charakterizováno rovnicí kontinuity: [11]

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.26)$$

Nebo integrální tvar: [11]

$$I = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (3.27)$$

Rovnice kontinuity udává, že proud tekoucí z uzavřené plochy je roven úbytku náboje uvnitř této plochy. Zde levá strana rovnice je proud vedený a pravá proud posuvný. U proudového stacionárního pole zanedbáváme proud posuvný. [11]

Platí:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0 \quad (3.28)$$

V integrálním tvaru nám pak vyjde rovnice ve tvaru Kirchhoffova zákona: [11]

$$\sum I = 0 \quad (3.29)$$

### **Elektrické pole v okolí oblasti průmyslové činnosti**

Analýzu elektrického pole v oblastech zasaženými bludnými proudy provádíme pomocí určení potenciálů v dané oblasti. V praxi se určuje potenciál daného místa vůči referenční elektrodě (vzdálené zemi).

Dle Gaussovy věty a dle analogie pole elektrostatického a proudového stacionárního můžeme z rovnice kontinuity odvodit: [11]

$$E = \frac{I}{\gamma \cdot S} \quad (3.30)$$

Dále platí: [11]

$$\varphi = \int_l^\infty E \cdot dl \quad (3.31)$$

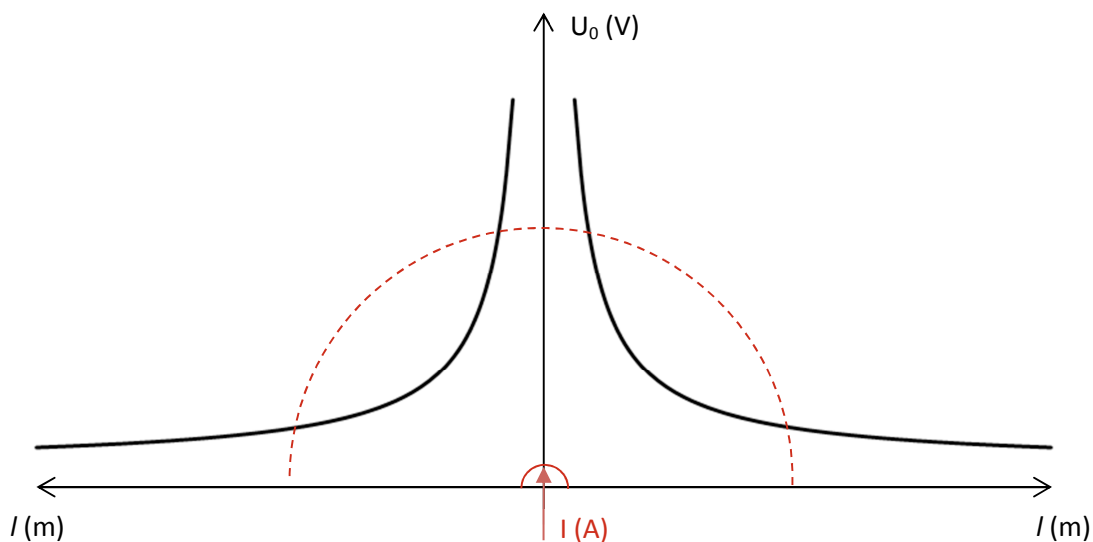
$$U = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3.32)$$

Budeme uvažovat šíření proudu od půlkulové elektrody, umístěné těsně na povrchu země, a zemi považujeme za homogenní prostředí. Pak po dosazení do vztahu 3.30 a 3.31 vyjde: [5] [11]

$$\varphi = \int_l^\infty \frac{I}{\gamma \cdot 2\pi \cdot l^2} \cdot dl \quad (3.33)$$

Hledáme-li napětí na povrchu země, vůči referenční elektrodě (vzdálená zem, nulový potenciál), pak lze šíření popsat: [5] [11]

$$U_0 = \frac{I}{\gamma \cdot 2\pi \cdot l} \quad (3.34)$$



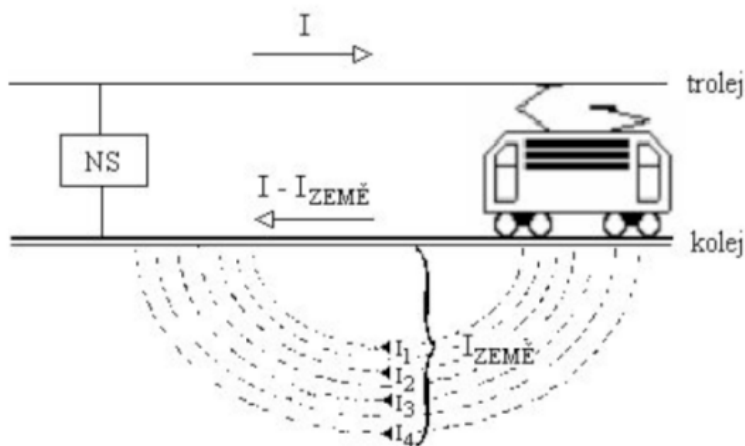
Obr. 20 – Velikost potenciálu kolem uzemněné půlkulové elektrody

Graf na Obr. 20 znázorňuje spád potenciálu na povrchu země, v závislosti na vzdálenosti od uzemněné elektrody. Graf vyjde po dosazení do rovnice 3.34. Dále je zde znázorněn tok proudů. Proud teče kolmo na ekvipotenciální plochy. Ekvipotenciální plocha je plocha o shodném potenciálu, v našem případě se jedná o půlkulovou plochu.

V praxi se obdobného principu využívá k určování rezistivity půdy (Wennerova metoda měření), nebo k určení zemních odporů uzemňovacích soustav.

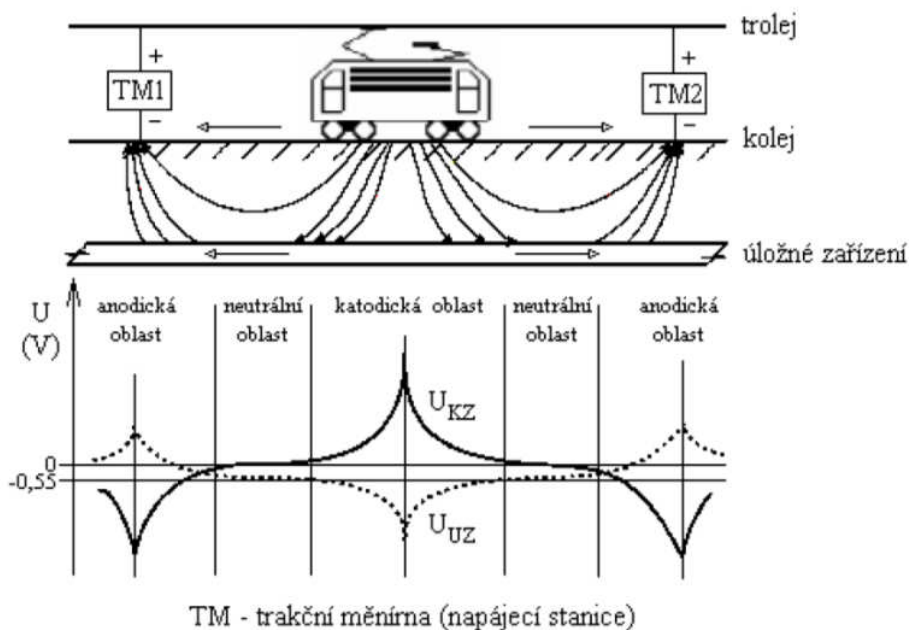
### Šíření bludných proudů v okolí elektrizovaných stejnosměrných tratí

Jelikož se proud nešíří po nejkratší možné dráze, ale všemi vodivými cestami, tvoří železniční spodek ke kolejím vodivý bočník. Velikost proudu protékajícího zemí pak záleží především na chemickém složení půdy a vlhkosti, mluvíme zde o iontové vodivosti. [10]



Obr. 21 – Průběh proudu tekoucího v blízkosti elektrizované tratě [10]

Na předchozím obrázku je uveden příklad šíření proudu v homogenním prostředí. Jedná se o idealizovaný případ, ve skutečnosti je téměř vždy půda narušena geologickými zlomy, různou vlhkostí, nebo různým geologickým a chemickým složením. Pokud se v zemním proudovém poli nachází nechráněná kovová úložná zařízení (typicky potrubí, nebo svodidla, ploty, zemniče, atd.) může šíření proudů v okolí tratě překročit vzdálenost několika desítek kilometrů. [10]



Obr. 22 – Průběh proudu a rozložení potenciálů na úložném zařízení v okolí tratě s vyznačením korozně nebezpečných oblastí [10]

Podle potenciálu, vůči zemi, rozlišujeme na úložném zařízení tři oblasti: [10]

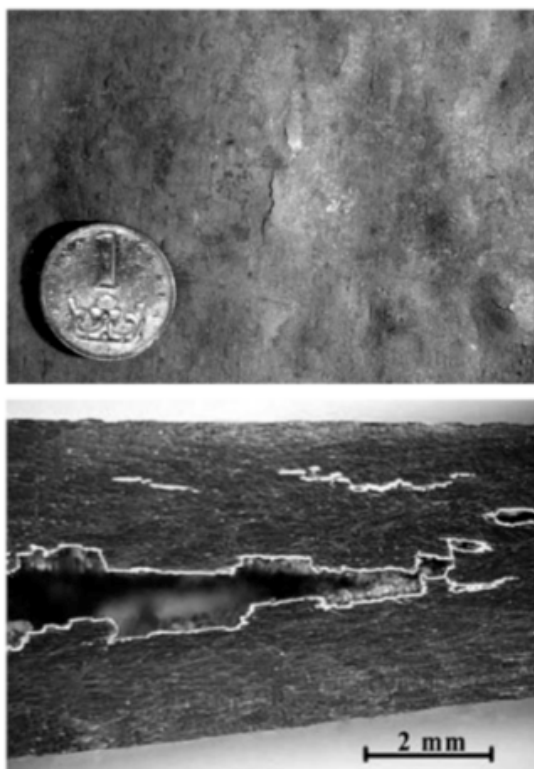
- katodická oblast – oblast, kde proud vstupuje do úložného zařízení
- neutrální oblast – oblast, kde proud úložným zařízením pouze protéká
- anodická oblast – oblast, kde proud z úložného zařízení vytéká

### 3.2.3 Korozivní účinky bludných proudů

Z hlediska korozivních účinků bludných proudů musíme věnovat pozornost především dvěma oblastem. Oblasti katodické a oblasti anodické.

#### Katodická oblast

Katodická oblast je místem, kde vstupuje proud z okolní půdy do úložného zařízení. Na toto místo nepůsobí elektrochemická koroze, ale vlivem vzniku vodíku v blízkosti katody dochází v této oblasti ke křehnutí materiálu úložných zařízení. Tento jev je nebezpečný u tlakových potrubí, zvláště pak u plynovodů. Vodík dále v materiálu vyvolává určitý tlak, který může vyústit v samovolné prasknutí kovu a vytvoření tzv. vodíkových puchýřů. [12]



Obr. 23 – Poškození oceli vodíkem (tzv. vodíkové puchýře) [12]

#### Anodická oblast

Z hlediska korozivních účinků je nejsledovanější oblastí oblast anodická. Vlivem průtoku elektrického proudu dochází k elektrolytickému jevu a k uvolňování atomů kovů na anodě. Rychlost rozrušování anody je dána Faradayovým zákonem: [2] [9]

$$m = A \cdot Q = A \cdot I \cdot t \quad (3.35)$$

Kde:	$m$	množství vyloučeného kovu
	$A$	elektrochemický ekvivalent kovu
	$Q$	celkový náboj iontu
	$I$	protékající proud
	$t$	doba trvání elektrolytického jevu

Tab. 4 – Elektrochemické ekvivalenty vybraných kovů (tabulkové hodnoty)

kov	Sn	Al	Cu	Pb	Fe
$A \text{ (kg} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot 10^{-9}$	338,6	93,3	332,3	1073,3	289,3

Uvedený vztah lze chápat jako orientační. Ve skutečnosti se bude lišit podle chemického složení půdy, podle vlhkosti, zda je anodická a katodická oblast přilehlá, nebo oddělená. [2] [9]

Dále může koroze vznikat vlivem vzniku galvanických článků. Korozivní články pak mohou vznikat jak stykem dvou různých kovů v elektrolytu, popřípadě jejich koncentrací, tak i vlivem nestejněho fyzikálního, nebo chemického, složení téhož kovu, vlivem nestejnoměrného tlaku v téže kovu, různě provzdušněnými částmi povrchu, nebo taky vlivem účinku bakterií. [2] [9] [10]

### 3.2.4 Poruchové stavy vyvolávající vznik nežádoucích zemních proudů

Vyvedení bludných proudů do větších vzdáleností, od místa zdroje, bývá spojeno s mnoha problémy, především pak se ztíženým rozpoznáním původu bludných proudů a určení optimální protikorozi ochrany.

Způsobů vyvedení proudu do značných vzdáleností, vlivem poruchových stavů, bylo pozorováno několik. Jmenovitě lze zmínit: [13]

- spojení kolejnice s ochranným vodičem distribuční sítě
- spojení kolejnice se zemničem
- odizolování neelektrizovaných tratí

#### Spojení kolejnice s ochranným vodičem distribuční sítě

Spojení kolejnice s ochranným vodičem distribuční sítě vzniká obvykle nepřímo, spojením kolejnice se zemničem (viz. níže), který je zároveň spojen s ochranným vodičem, nebo zavléčením bludného proudu přes vzdálený zemnič.

Tímto způsobem se může proud šířit do vzdálených oblastí a účinky těchto proudů mohou být pozorovány nejen v průmyslových oblastech, ale i v rodinných domech.

#### Spojení kolejnice se zemničem

Typickou poruchou, při níž dojde ke spojení kolejnice se zemničem, je vadné ukolejnění, nebo porucha na průrazce. Při těchto poruchách přechází proud z kolejnice přes zemniče, např. osvětlovací lampy, mostní konstrukce, atd., do země. Tím vznikají bludné proudy a hrozí zvýšené riziko elektrochemické koroze v okolí těchto zemničů.

Ke spojení kolejnice se zemničem také dochází vlivem vadné izolace mezi kolejnicemi a ocelovými uzemněnými konstrukcemi, typicky na mostech, nebo v halách a depech kolejových vozidel.

### **Odizolování neelektrizovaných tratí**

Řada neelektrizovaných tratí a vleček, zvláště pak starších, popřípadě již nepoužívaných, mohou tvořit náhodné zemniče. Absence, nebo poškození, izolačních styků pak tyto tratě předurčuje k vytvoření proudovodných drah, které se mohou táhnout do značných vzdáleností od elektrizovaných drah. Stejný problém též vyvolá odstavení vagonů, nebo vlaků, přes izolační styk. [13]



## 4. Předpisy a poznatky pro minimalizaci vzniku a účinků bludných proudů

Pro stavbu a provoz železničních sítí je vydáno mnoho předpisů, norem a zákonů. Při stavbě je nutné řídit se zákonem §177/1995 Sb. Dále je třeba brát v úvahu normy, zejména pak ČSN EN 50 122 nebo další normy ČSN 33 5505, ČSN 34 1500, ČSN 34 2613, a další. Při navrhování, stavby a provozu kolejiště je také vydáno mnoho podnikových norem a předpisů, kterými je nutné se řídit. Jmenovitě lze zmínit např. Služební rukověť Českých drah (respektive SŽDC) SR 5/7, a jiné, nebo Technické podmínky TP 124, vydané ministerstvem dopravy.

### 4.1 Diagnostika bludných proudů a měření v kolejišti

Veškerá protikorozní opatření se provádějí na základě korozivního průzkumu, jehož rozsah je dán ekonomickými a ekologickými požadavky. Výstupem korozivního průzkumu je souhrn fyzikálních, chemických, geologických, biologických a dalších vlivů, které vedou k určení optimálního řešení protikorozní ochrany daného zařízení.

Základní korozivní průzkum obvykle zahrnuje:

- měření rezistivity půdy
- měření proudové hustoty a intenzity zemního proudového pole
- zjištění zdrojů bludných proudů
- měření na stávajících zařízeních

#### 4.1.1 Měření k určení rizika vzniku elektrochemické koroze

Mezi základní měření korozivního výzkumu, sloužící k vyhodnocení rizika vzniku elektrochemické koroze, patří měření k určení charakteristiky dané oblasti. K tomuto účelu se provádějí dvě měření: [9]

- Měření zdánlivého odporu
- Měření intenzity a proudové hustoty zemního proudového pole

#### Měření zdánlivého odporu půdy

Rezistivita hornin, respektive půdy, je základním ukazatelem korozivní agresivity prostředí, přičemž platí, že čím je nižší rezistivita, tím je vyšší riziko působení elektrochemické koroze. [9]

Agresivitu prostředí dělíme do čtyř skupin: [9]

Tab. 5 – Agresivita prostředí (tabulkové hodnoty) [9]

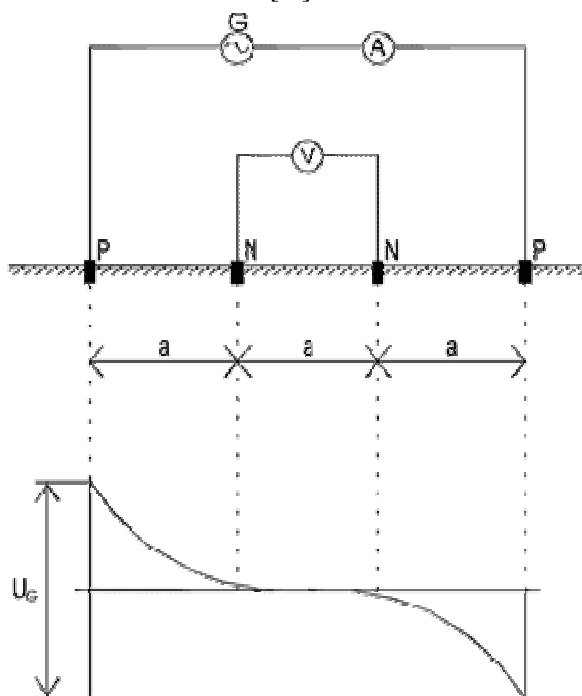
$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Agresivita půdy	Stupeň agresivity
Nad 100	Neagresivní	I
50 až 100	Málo agresivní	II
23 až 52	Středně agresivní	III
Do 23	Velmi agresivní	IV

Rezistivita je určena jako odpor krychle o hraně 1 m, jenž klade stejnosměrnému proudu tekoucího kolmo na stěnu krychle. Pro terénní měření bylo vytvořeno mnoho metod k určení rezistivity půdy, přičemž nejpoužívanější je metoda Wennerova. [9]

Wennerova metoda využívá uspořádání elektrod v přímce s konstantním rozstupem. Měrný odpor se pak vypočte:

$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (4.1)$$

Kde:  $\rho$  rezistivita půdy [ $\Omega \cdot m$ ]  
 $\Delta U$  napětí naměřené mezi napěťovými elektrodami [V]  
 $I$  proud naměřený mezi proudovými elektrodami [A]  
 $a$  rozteč mezi elektrodami [m]



Obr. 24 – Měření rezistivity půdy Wennerovou metodou [9]

### Měření intenzity a proudové hustoty zemního proudového pole

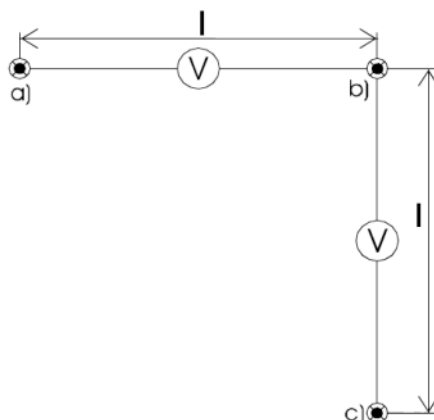
Tímto měřením se určuje směr, smysl a proudová hustota zemního proudového pole, přičemž můžeme korozivní prostředí rozdělit podle proudové hustoty následovně: [9]

Tab. 6 – Korozivní prostředí [9]

$\sigma$ ( $\mu A \cdot m^{-2}$ )	Korozivní prostředí	Třída koroze
Pod 0,1	Velmi nízké	I
0,1 až 3	střední	II
3 až 100	zvýšené	III
Nad 100	Velmi vysoké	IV

Měření probíhá rozmístěním nepolarizovatelných elektrod, kolmo na sebe, přičemž elektrody  $a$  a  $b$  jsou rovnoběžné s kolejnicemi. Vzdálenost elektrod bývá 2,5 až 50 m, nejčastěji ale 10 m.

Velikosti napětí zaznamenáváme registračními voltmetry, řádově několik hodin, z nichž pak určíme maximální a střední hodnotu napětí a vypočteme intenzitu proudového pole. [9]



Obr. 25 – Rozmístění nepolarizovatelných elektrod [9]

Intenzitu elektrického pole pak určíme:

$$\sigma = \frac{E_{stř}}{\rho} \quad (4.2)$$

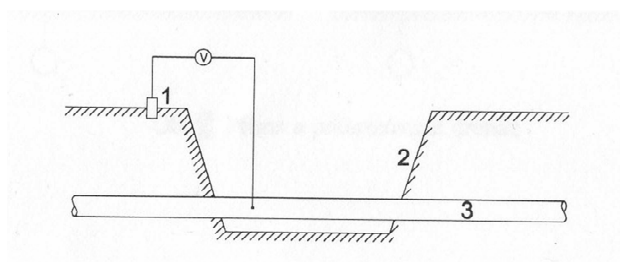
Kde:  $\rho$  rezistivita půdy [ $\Omega \cdot m$ ]

$E_{stř}$  střední hodnoty intenzity elektrického pole [ $V/m$ ]

$\sigma$  proudová hustota zemního proudového pole [ $A/m^2$ ]

#### 4.1.2 Měření na stávajícím zařízení

Měřením na stávajícím zařízení se rozumí kontrola ohrožení elektrochemickou korozí již vybudovaných úložných zařízení. Kontrola se provádí měřením potenciálu úložného zařízení, vůči nepolarizovatelné elektrodě. [2]



- 1 – nepolarizovatelná elektroda Cu-CuSO<sub>4</sub>
- 2 – Výkop
- 3 – Úložné zařízení

Obr. 26 – Měření na stávajícím zařízení [10]

Udává se, že ocelové úložné zařízení je chráněno, pokud potenciál vůči nepolarizovatelné elektrodě je  $-0,85\text{ V}$ , v prostředí s nebezpečím biologické koroze je potenciál  $-0,92\text{ V}$ . [2]

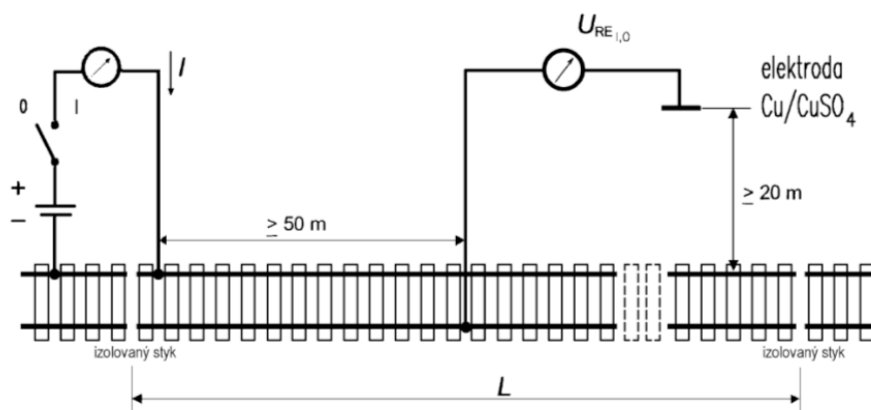
### 4.1.3 Měření v kolejišti

Norma ČSN EN 50 122-2 uvádí metodu měření izolačního stavu kolejiště a metodu měření odporu kolejnic v kolejišti. Uvedené měření mohou být ukazatelem nevhodných parametrů tratě a tím i ukazatelem rizika vzniku bludných proudů a elektrochemické koroze.

#### Měření izolačního stavu kolejiště

Měření izolačního stavu kolejiště se provádí za účelem vykazání dovolené svodové vodivosti, dané vyhláškou §177/1995 Sb. K tomuto účelu lze využít metodu zakotvenou v normě ČSN EN 50 122-2, jejíž princip je na Obr. 27:

$$G'_{RE} = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{U_{RE1} - U_{RE0}} \quad (4.3)$$



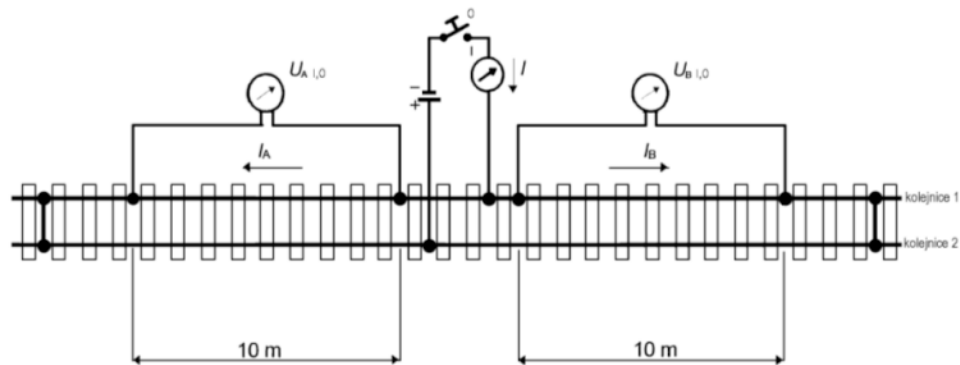
Obr. 27 – Měření izolačního stavu kolejiště dle ČSN EN 50 122-2 [25]

Metoda popsaná normou ČSN EN 50 122-2 je vhodná pro použití na tratích, jenž vykazují vysokou hladinu izolačního odporu kolejnic vůči zemi (typicky nové kolejiště). Dále je nutné eliminovat rušivé vlivy, vznikající především nerovnoměrným odběrem trakce.

#### Měření odporu kolejnice

V mnoha případech je třeba znát měrný odpor kolejnic. Nemáme-li k dispozici přesné údaje výrobce, lze k určení odporu využít metodu zakotvenou v normě.

$$R_{kolej\ 10m} = \frac{(U_{A1} - U_{A0}) + (U_{B1} - U_{B0})}{I} \quad (4.4)$$



Obr. 28 – Měření odporu kolejnice dle ČSN EN 50 122-2 [25]

Princip měření spočívá v měření úbytku napětí na daném délkovém úseku. Kompenzace rušivých vlivů je provedena měřením na obě strany od připojení vnějšího zdroje.

## 4.2 Způsoby zabráňující vzniku elektrochemické koroze

Elektrochemická koroze má neblahý vliv na úložná zařízení, vedoucí až k jejich destrukci. Odstavení z provozu, zvláště u důležitých zařízení (plynovody, ropovody), bývá spojeno s dalekosáhlými technickými, ale hlavně ekonomickými problémy. Proto je nutné tyto zařízení před elektrochemickou korozí chránit.

Dle provedení lze ochranu před elektrochemickou korozí rozdělit do tří skupin:

- omezení vzniku bludných proudů
- pasivní ochrana
- aktivní ochrana

### 4.2.1 Omezení vzniku bludných proudů

Základním předpokladem zamezení vzniku a účinků elektrochemické koroze je omezení, nebo úplné vyloučení, vzniku bludných proudů. K tomuto účelu lze využít následujících kroků: [9]

- Zvýšení přechodového odporu mezi kolejemi a zemí
- Zvýšení elektrické vodivosti kolejí
- Zajištění předepsané hodnoty izolačního odporu zpětného vedení mezi tratí a měřnou
- Minimalizace vzdálenosti napájecích stanic
- Volba způsobu napájení trakční sítě (jednostranné, dvoustranné, čtyřstranné)
- Provozovat napájecí soustavu s co největším napětím

### 4.2.2 Pasivní korozivní ochrana

Mezi pasivní korozivní ochrany patří opatření zamezující vstup a výstup bludných proudů do a z úložného zařízení. Nejčastější metody jsou: [9]

- Izolace povrchu (plastová, asfaltová)
- Stavební ochrana (uložení do kanálů)
- Obsypání úložného zařízení nevodivou zeminou (štěrk, písek, kamení)
- Vhodná volba trasy úložného zařízení

### 4.2.3 Aktivní korozivní ochrana

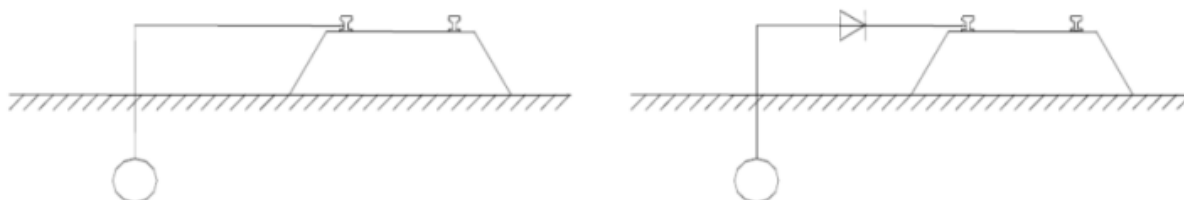
Aktivní ochrana udržuje trvale záporný potenciál úložného zařízení vůči zemi a určuje odvod proudů pouze přes ochranu. Zamezuje tím vzniku anodických oblastí a korozi v nevhodných místech. Aktivní ochrana se považuje za ochranu doplňkovou. [9]

Aktivní ochrany lze rozdělit na tři druhy:

- drenáže (přímá, polarizovaná, zesílená polarizovaná)
- obětní anoda
- katodická ochrana

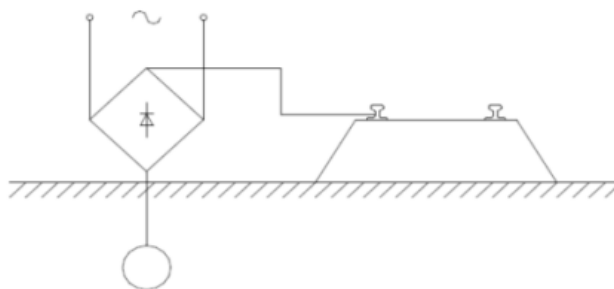
#### Přímá, polarizovaná, zesílená polarizovaná drenáž

Přímá drenáž je nejjednodušší způsob korozivní ochrany, nelze ji však použít tam, kde se mění polarita napětí. Při změnách polarity se využívá polarizovaná drenáž. Ve své podstatě je polarizovaná drenáž drenáží přímou, doplněnou o usměrňovací diodu. [9]



Obr. 29 – Přímá (vlevo) a polarizovaná (vpravo) drenáž [9]

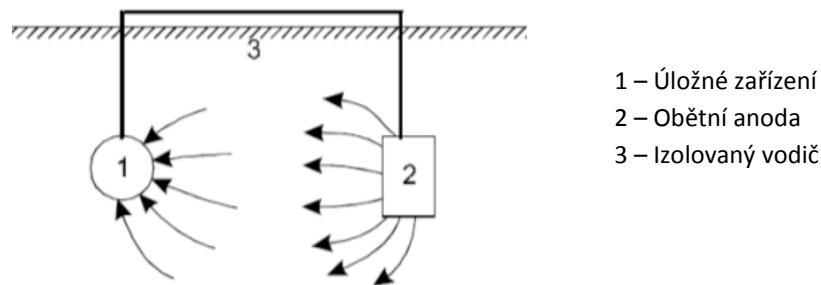
Zesílená polarizovaná drenáž se používá v místech zvýšené půdní koroze a tam, již klasická drenáž nestačí.



Obr. 30 – Zesílená polarizovaná drenáž [9]

#### Obětní anoda

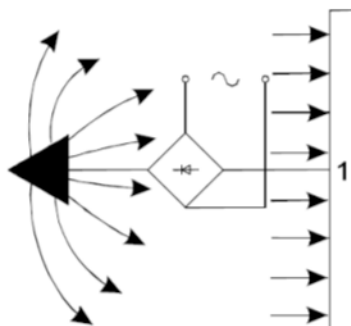
Jedná se o elektrodu ze slitin kovů, které mají záporný potenciál (Mg, Zn, Al), která se vodivě spojí s úložným zařízením. Úložné zařízení vytvoří katodu a přidaná elektroda anodu, která se vlivem průchodu proudu a elektrochemické korozi začne rozpouštět. Ochrana obětní anodou se nesmí využívat v oblastech s vysokou hustotou zemních proudů, tedy v blízkosti elektrizovaných drah. [9]



Obr. 31 – Ochrana obětní anodou [9]

### Katodická ochrana

Principiálně je katodická ochrana shodná s ochranou anodickou, je však doplněna o vnější zdroj, který dokáže vytvořit obětní anodu z libovolného kovu (obvykle se vyrábí z velkých železných částí). Tato ochrana je nejrozšířenější, využívá se hlavně k ochraně plynovodů, ropovodů a vodovodních řadů. [9]



Obr. 32 – Katodická ochrana [9]

## 4.3 Nutná opatření pro zachování bezpečnosti a provozuschopnosti elektrizovaných drah

Tato kapitola koresponduje s normou ČSN EN 50 122-1. Ochrana před úrazem elektrickým proudem se řídí též dle norem ČSN 33 2000-4-41, ČSN 33 2000-3, ČSN 33 2000-5-51, ČSN 34 1500, ČSN 34 1510, popřípadě dalších. Mluvíme-li o železnici, potom danou problematiku řeší nejen evropská norma EN 50 122, ale také jiné nařízení a směrnice (například podnikové normy a předpisy ČD nebo SŽDC), přičemž je dobré se jimi řídit.

### 4.3.1 Ochrana před úrazem elektrickým proudem

Norma EN 50 122 definuje ochranu před dotykem živých částí polohou a zábranou. Zvláště pro vyšší napětí se prioritně využívá oddělení polohou. Norma stanovuje minimální vzdálenosti od živých částí, typy zábran a krytů a také umístění trolejí. [24]

Jako ochrana před nebezpečným dotykem neživých částí se prioritně využívá přímé uzemnění trakční sítě. Nelze-ti toho dosáhnout, například z důvodu zamezení vzniku bludných proudů u stejnosměrných tratí, uzemňuje se přes opakovatelné průrazky. U obvodů nízkého napětí se dovolu

využití spotřebičů třídy II. V soustavách ss do 3 kV se též dovoluje neuzemňovat trolejové závěsy v tunelech v místech, které nejsou běžně přístupné. [24]

Na vodivých konstrukcích v blízkosti tratě, na které by v případě poruchy mohlo dopadnout trolejové vedení, nebo se mohl dotknout vychýlený pantograf, musí být provedeno opatření proti přetrvávajícímu nebezpečnému dotykovému napětí. Provedená opatření nesmí být v rozporu s protikorozními opatřeními. [24]

#### 4.3.2 Ochrana před potenciálem kolejnic

Za určitých podmínek se na kolejnicích objevuje potenciál. Za běžného provozu se na kolejnicích nachází místně a časově závislý potenciál (přístupné napětí), který z pravidla nepřevyšuje hodnot řádově desítek voltů. Při poruchách pak mluvíme o dotykovém napětí. Dále je uveden jen případ pro stejnosměrně tratě. [24]

Dovolené, nebo přístupné, napětí se rozlišuje dle doby trvání následovně: [24]

- krátkodobé ( $\leq 0,5$  s)
- přechodné ( $0,5 > t \geq 300$  s)
- trvalé ( $> 300$  s)

##### Krátkodobé trvání poruchy:

Hodnoty dovoleného dotykového napětí při krátkodobé poruše dle normy ČSN EN 50 122-1:

Tab. 7 – Dovolené dotykové napětí pro krátkodobé poruchy (ss síť) (dle normy ČSN EN 50 122) [24]

t (s)	U <sub>t</sub> (V)
0,02	940
0,05	770
0,1	660
0,2	535
0,3	480
0,4	435
0,5	395

##### Přechodné trvání poruchy:

Hodnoty dovoleného dotykového napětí při přechodné poruše dle normy ČSN EN 50 122-1:

Tab. 8 – Dovolené dotykové napětí pro přechodné poruchy (ss síť) (dle normy ČSN EN 50 122) [24]

t (s)	U <sub>t</sub> (V)
0,6	310
0,7	270
0,8	240
0,9	200
1	170
$\leq 300$	150



### **Dlouhodobé trvání poruchy:**

Dlouhodobě nesmí přístupné napětí překročit 120 V, v dílnách a jím podobných prostor pak 60 V. [24]

Pro zjištění splnění daných podmínek se provádí výpočet pro provoz za normálních podmínek a při poruše. Vyhodnocuje se úbytek napětí ve zpětném obvodu a při výpočtu se zle orientovat normou ČSN EN 50 122-1. [24]

### **Způsoby snížení potenciálu kolejnic:**

Pokud, dle výše zmíněných tabulek, dovolené dotykové, přístupové, napětí nevyhoví, musí se provést opatření ke snížení tohoto napětí, nebo provést kroky ke snížení potenciálu kolejnic. [24]

Norma pak jmenovitě doporučuje následující způsoby snížení potenciálu kolejnice:

- zlepšení uzemnění vodivých konstrukcí na snížení potenciálu v poruchovém stavu (musí být v souladu s protikorozní ochranou)
- změna, nebo vřazení průrazky napětí
- zesílení zpětného vedení
- izolace plochy stanoviště
- zkrácení doby přerušení zkratového proudu

### **4.3.3 Obvody zpětného proudu a ukolejnění**

Z hlediska bezpečnosti norma stanovuje připojení zpětného vedení (kolejnic) k měničům minimálně dvěma kabely, a to takovým způsobem, aby v případě poruchy zvládl jeden kabel přenášet 100 % výkonu. Ve zpětném obvodu se nesmí instalovat spínače bez blokování, pojistky, ani jiné rozpojovací prvky, které se dají rozpojit bez nástroje. [24]

Kolejnice musí být vodivě spojeny podélně a příčně ve vhodných intervalech. Na přerušených tratích je nutné zachovat spojitost zpětného proudu, tj., musí být propojeny lanem, přičemž musí snášet tepelné účinky zpětného proudu a z mechanického hlediska musí mít minimální průřez 50 mm<sup>2</sup>. [24]

Dále je normativně stanovený svod mezi kolejnicemi a mezi kolejnicí a zemí, přičemž dle §177/1995 Sb nesmí svod mezi kolejnicemi, stávající tratě, překročit 0,67 S.km<sup>-1</sup> a 1,5 S. km<sup>-1</sup> mezi kolejnicí a zemí. [24]

## 5. Řešení problematiky bludných proudů v depu kolejových vozidel ve stanici v Bohumíně

Řešení problematiky bludných proudů v Bohumíně spočívalo v nalezení příčiny „přepalování svodičů bleskosvodů“ na hale THU (hala technickohygienické údržby) a analýze jejího odstranění. Problém byl řešen pod záštitou VŠB-TUO na základě poptávky Českých drah v rámci projektu: „Analýza problémů působených zpětnými trakčními proudy na pracovišti PJ Bohumín a návrh jejich řešení“. Dále zde uvedené údaje vycházejí z materiálů poskytnutých k orientaci při měření a závěrečných zpráv z měření, které nejsou uveřejněny.

### 5.1 Definice problému

Problém byl pozorován nadměrným zahříváním svodičů bleskosvodu na hale THU ve vlakové stanici. Prvotní řešení problému bylo provedeno vřazením průrazky mezi svodem a zemničem bleskosvodu. Po uvedení do provozu se průrazka projevovala četným spínáním, které vyústilo v její zničení.

Dalším pozorovaným jevem bylo různé jiskření mezi kolejnicemi a konstrukcí haly, přičemž po rozpojení bleskosvodu došlo k určitému zmírnění pozorovaného jevu (jelikož je konstrukce haly uzemněna). Tento jev je způsoben rozdílným potenciálem mezi zemí a kolejnicemi. K určitému zmírnění tohoto jevu by došlo zkvalitněním zpětné cesty k trakční měničárně, avšak úplné vymizení, při současném systému napájení, patrně není možné.

Problém s jiskřením byl klasifikován jako samostatný problém a nebyl tudíž v rámci tohoto projektu řešen.

#### 5.1.1 Umístění a popis haly THU

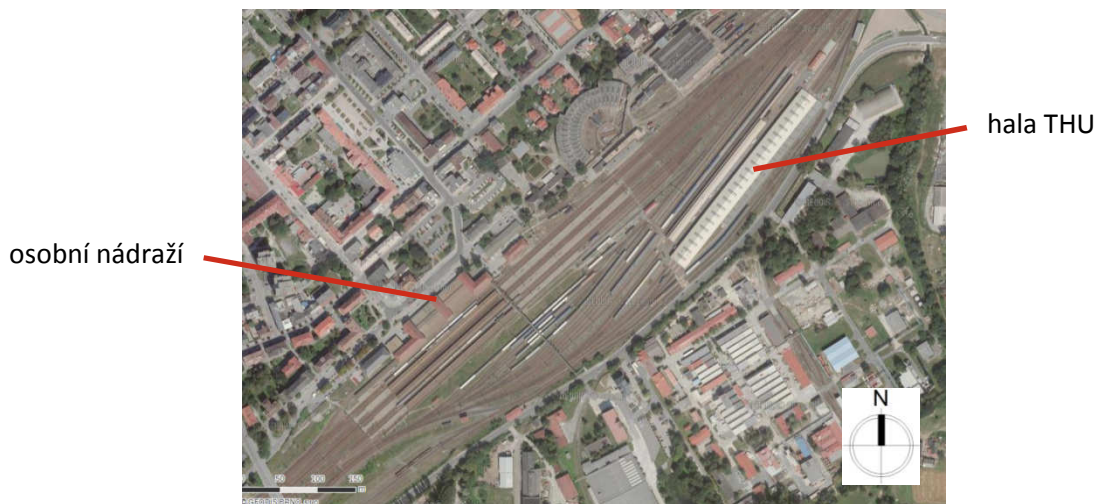
Z hlediska problematiky bludných proudů a úbytků napětí se vlaková stanice Bohumín nachází v nevýhodné poloze. Leží na dvoukolejné koridorové trati 270 (respektive 320) zhruba uprostřed napájecích stanic. Nejbližší trakční měčárna, vzdálená cca 8,5 km od stanice Bohumín, se nachází v Dětmovicích, zde navíc trať zatáčí. Druhým směrem je měčárna vzdálená cca 14 km která se nachází v Ostravě Svinově (viz. Obr 33).



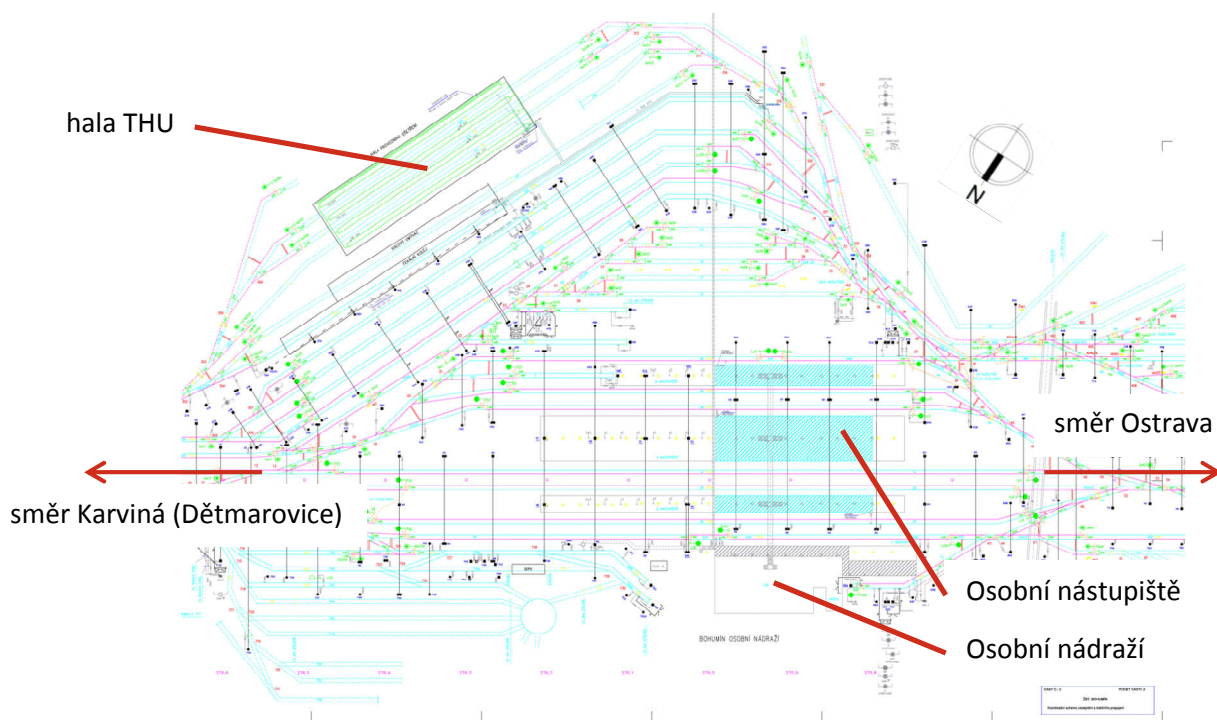
Obr. 33 – Výřez z mapy železniční sítě ČR, pro oblast Ostravska [16]

Bohumín je pro mnoho osobních i nákladních vlaků výchozí/koncovou, stanicí. Proto v této stanici můžeme předpokládat značně nerovnoměrný odběr elektrické energie, daný četnými posuny, a údržbou, lokomotiv a vagonů. Tyto činnosti mohou zmiňovanou problematiku zhoršovat.

Samotná hala THU se nachází nedaleko osobního nádraží (viz. Obr 34). Hala je ocelové konstrukce, částečně zděná a opláštěvaná plechem, s plechovou střechou, dlouhá bezmála 300 m a nachází se zde 3 koleje. Tato hala slouží k běžné údržbě a předtápění vagonů. Kolejnice v hale jsou izolovány od venkovního kolejiště a jsou ukolejnněny Cu lanem, taktéž jsou izolovány od konstrukce haly. V hale není vedena trolej a nemá vlastní zdroj napájení pro předeřev vagonů, napájení pro předtápění je přivedeno z trolejového vedení vně haly.



Obr. 34 – Umístění haly THU ve stanici v Bohumíně



Obr. 35 – Výřez ze schématu železniční stanice Bohumín

### 5.1.2 Nástin příčiny zdroje problému

Jako jediná možná příčina zahřívání bleskosvodů byla stanovena v průchodu proudů skrz zmíněné bleskosvody. Dále tedy byly hledány zdroje a cesty těchto proudů.

Nejpravděpodobnější variantou jejich vzniku se jevilo vodivé spojení konstrukce haly s kolejištěm, tedy stav, kdy přes špatně provedenou nebo poškozenou izolaci protékají proudy buď přímo z kolejnic, nebo z ukokolejňovacího vedení, do kovové konstrukce haly a odtud přes bleskosvody do země, kde se v podobě bludných proudů uzavírají směrem ke zdroji.

Další, spíše teoretickou, možností je vstup bludného proudu skrze jeden zemnič do bleskosvodu a výstup druhým zemničem do země. Tato možnost se ale jevila krajně nepravděpodobná a byla by identifikována hned při prvním měření rozdílným potenciálem obou zemničů.

## 5.2 Měření k zjištění příčiny vzniku bludných proudů

Ke zjištění příčiny vzniku bludných proudů byly provedeny celkem 3 bloky měření, přičemž jednotlivé bloky na sebe navazují.

Tyto bloky jsou:

- určení zdroje bludných proudů
- určení směru toků proudů přes halu
- dohledání příčiny vzniku bludných proudů

### 5.2.1 Určení zdroje bludných proudů

První měření bylo provedeno za účelem určení zdroje bludných proudů. Tohle měření mělo za úkol potvrdit, nebo vyvrátit, domněnku toku proudů z vnějšího kolejiště do haly.

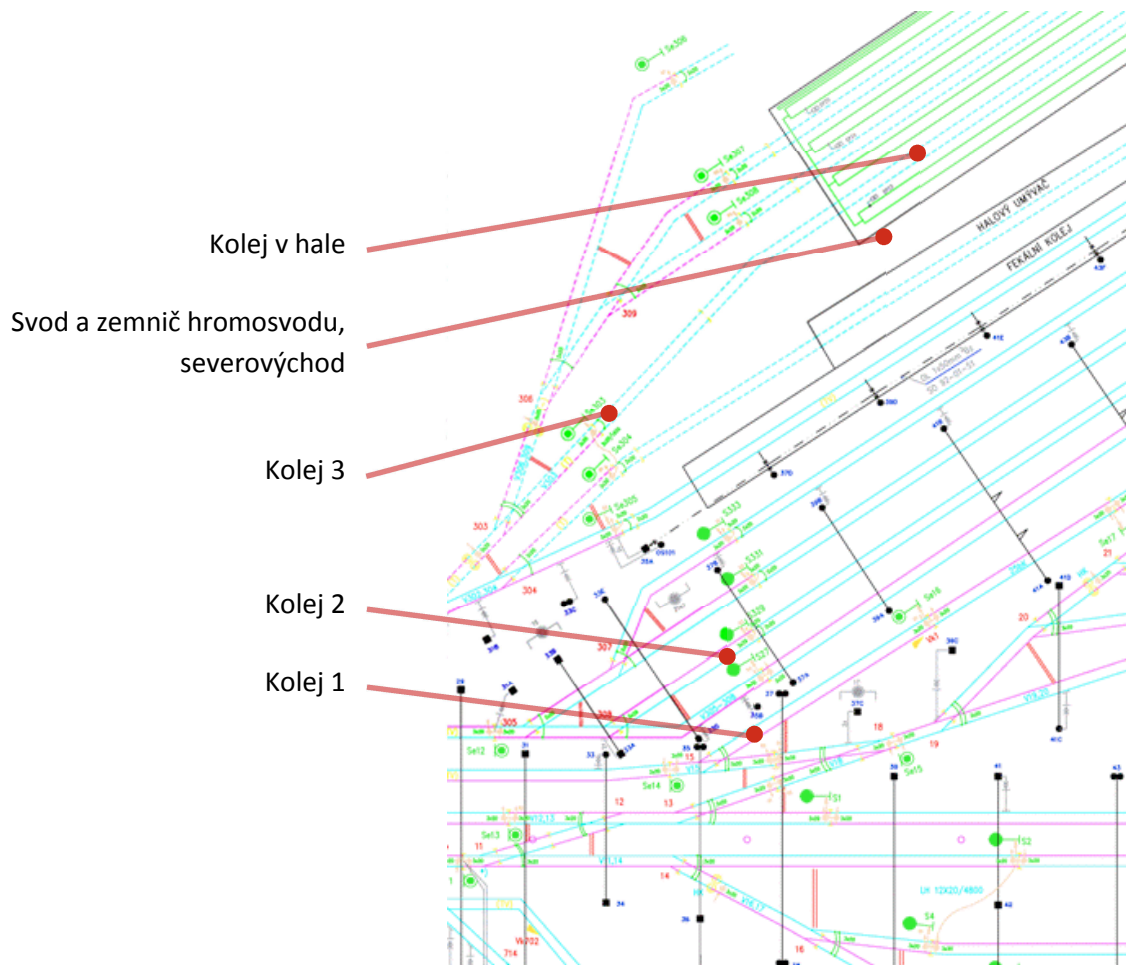
#### Metodika měření

Měření spočívalo v určení potenciálů a jejich průběhů vůči referenční elektrodě. Měření potenciálů probíhalo:

- na konstrukci haly (ocelový nosník uvnitř haly, ve schématu není naznačeno)
- na obou svodech bleskosvodů (ve schématu je naznačen jen severovýchodní, jihozápadní je na druhé straně haly)
- na obou zemničích bleskosvodů (ve schématu je naznačen jen severovýchodní, jihozápadní je na druhé straně haly)
- na kolejích v hale
- na dvou kolejích v kolejišti (kolej 1, 2)
- na koleji před vjezdem do haly (kolej 3)

Přičemž kolej 3 je vůči ostatním kolejím izolována izolačním stykem (nemělo by se na ní objevovat napětí), kolej 1 a kolej 2 jsou vůči sobě vodivě spojeny, taktéž oba svody bleskosvodu jsou vůči sobě vodivě spojeny, referenční elektroda byla umístěna cca 150 m od kolejiště.

Rozmístění měřicích míst:



Obr. 36 – Rozmístění měřicích míst

Měření probíhalo po dobu bezmála 24 hodin v sekundových intervalech, za běžného provozu, většinu doby v nepřítomnosti obsluhy. Naměřené údaje byly zaznamenávány v PC prostřednictvím měřicí karty a software. Interpretace výsledků proběhla prostřednictvím vývojového prostředí LabVIEW.

Měřicí karta byla 16-ti kanálová, 8-mi bitová USB-6210 od výrobce National Instruments. Parametry karty:

- šířka pásma 450 kHz
- maximální vzorkovací rychlost 250 kS/s, měření na jednom kanále
- vstupní rozsah od  $\pm 0,2$  V do  $\pm 10$  V

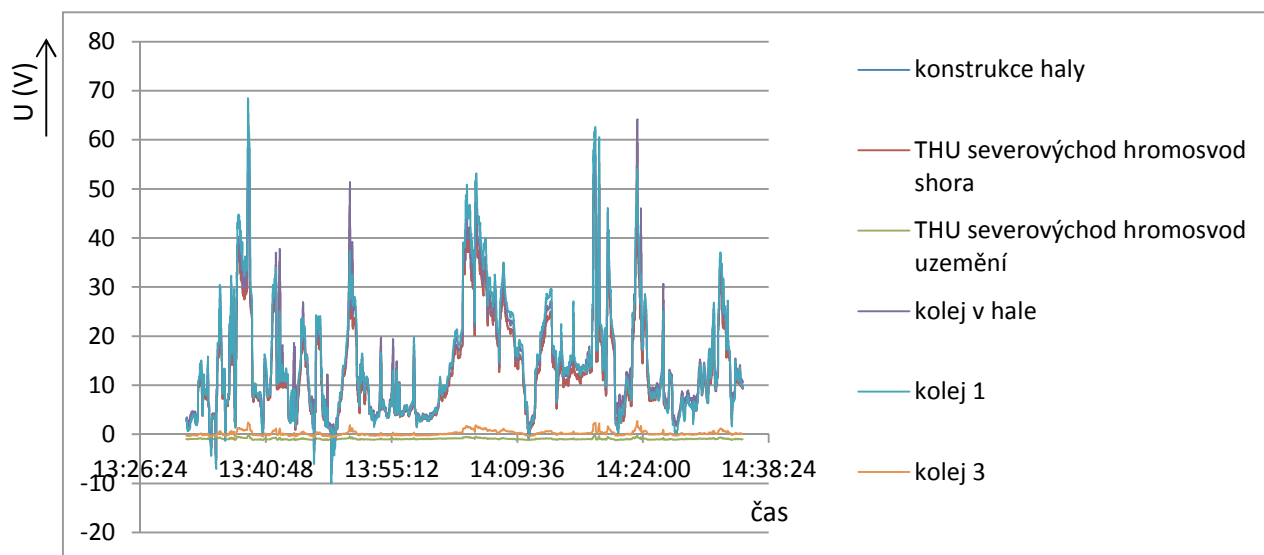
### Výsledky měření

Dle předpokladů byly na koleji 1 a 2 naměřeny shodné průběhy a velikosti napětí. Taktéž oba svody bleskosvodu byly rovnocenné. Proto pro přehlednost bude z následujících grafů vyňat průběh napětí na koleji 2 a průběh napětí na bleskosvodu na jihozápadní straně haly.

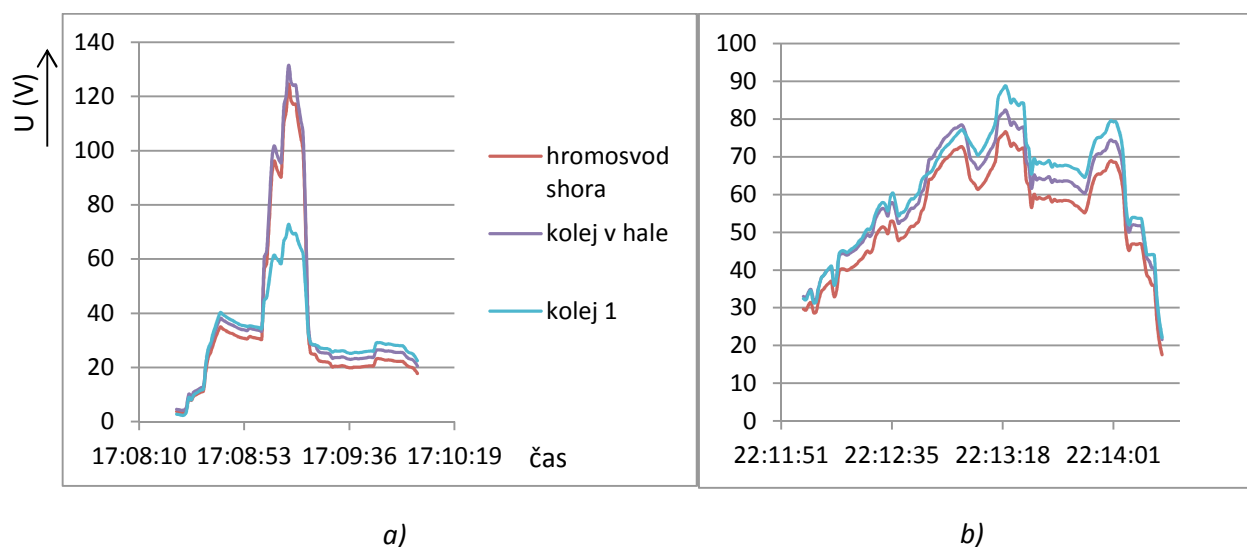
Na zemniči bleskosvodu na severovýchodní straně byly naměřeny shodné průběhy a velikosti napětí, jako na zemniči ze strany jihozápadní. Tato shodnost jednoznačně vylučuje příčinu nadměrného zahřívání svodů v důsledku protékání bludného proudu cestou: zem, zemnič, bleskosvod, zemnič, zem. Pro přehlednost je v následujících grafech zanesen průběh napětí pouze jednoho zemniče.

Z ukázky průběhů potenciálů, v grafu na obrázku Obr. 37, lze vyčíst následující. Hromosvod (svod), konstrukce haly, koleje v hale a kolej 1 (vnější kolejíště) mají přibližně shodné průběhy napětí jak do tvaru, tak do velikosti. Lze tedy tvrdit, že vyjmenované prvky jsou vodivě spojeny, tudíž je vadná izolace mezi kolejnicemi (nebo ukolejňovacím lanem) a konstrukcí haly (nebo hromosvodem).

Dále lze z grafu vyčíst, kolej 3 má vůči zemi potenciál nulový, nebo blízký nule. Tedy kolej je od ostatního kolejíště izolována a izolační styky jsou v pořádku. Taktéž zemniče vykazují vůči referenční elektrodě nulový, nebo jen minimální, potenciál.



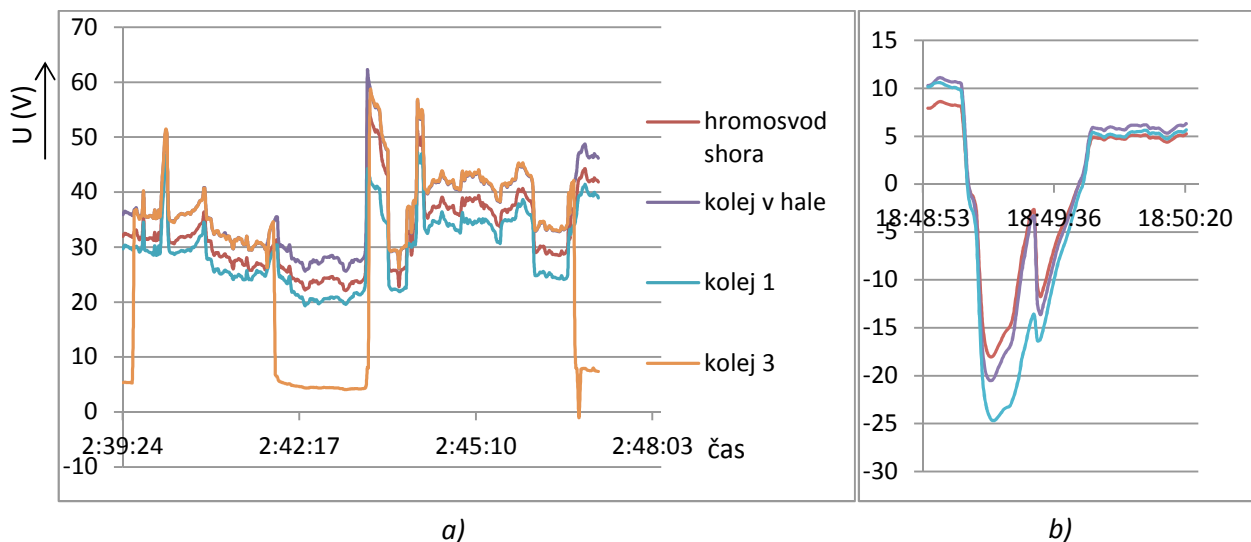
Obr. 37 – Graf potenciálů vůči referenční elektrodě



Obr. 38 – Maximální hodnoty potenciálů v hale (vlevo) a venku (vpravo)



Grafy na Obr. 38 ukazují maximální hodnoty potenciálů kolejnic, vůči referenční elektrodě. Graf *a*) značí maximální naměřenou hodnotu potenciálu na koleji uvnitř haly. Je patrné, že potenciál uvnitř haly je v daném okamžiku mnohem vyšší, než potenciál na vnějším kolejišti. Tento efekt lze interpretovat náhlým zvýšením aktivity v hale (začátek předtápění vagonů, náhlý nárůst spotřeby energie). Potom proud teče z koleje v hale do vnějšího kolejiště. Graf *b*) pak ukazuje maximální naměřený potenciál na hlavní trati. V tuto dobu byl zvýšený odběr proudu na vnějším kolejišti.



Obr. 39 – Nárůst potenciálu na koleji 3 (vlevo) a minimální hodnota potenciálů na koleji 1 (vpravo)

Další zvláštnosti na změřených průbězích jsou na grafech na Obr. 39. Na grafu *a*) je vidět nárůst potenciálu na koleji 3, až na velikost potenciálu koleje v hale, který je patrně zapříčiněn posunem lokomotivy, nebo vagonů, přes izolační styk mezi oběma kolejemi. Graf *b*) znázorňuje minimální hodnotu potenciálu na vnějším kolejišti. Zde se potenciál dostává do záporných hodnot, tedy proudy tečou směrem do kolejiště. Vzhledem k poloze Bohumína, vůči napájecím stanicím, je tento efekt nejspíše způsoben rekuperačním brzděním lokomotiv.

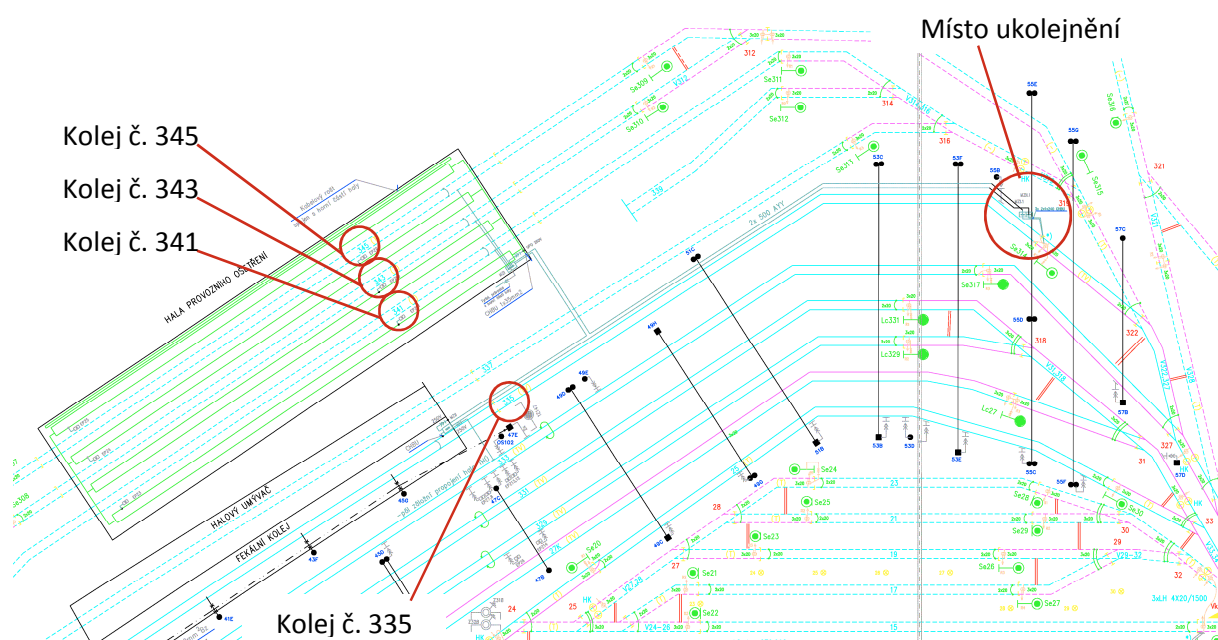
Měření bylo provedeno s rozpojenými svodiči bleskosvodů, od svých zemničů. Při tomto stavu se proud neuzavírá vůbec, nebo jen ve značně omezené míře. Je zřejmé, že při spojení zemniče se svodičem bleskosvodu jím začne protékat proud, který má svůj původ ve vnějším kolejišti, v menší míře pak také v samotné hale (spotřeba energie v hale, předtápění vagonů).

### 5.2.2 Určení směru toku proudu přes halu

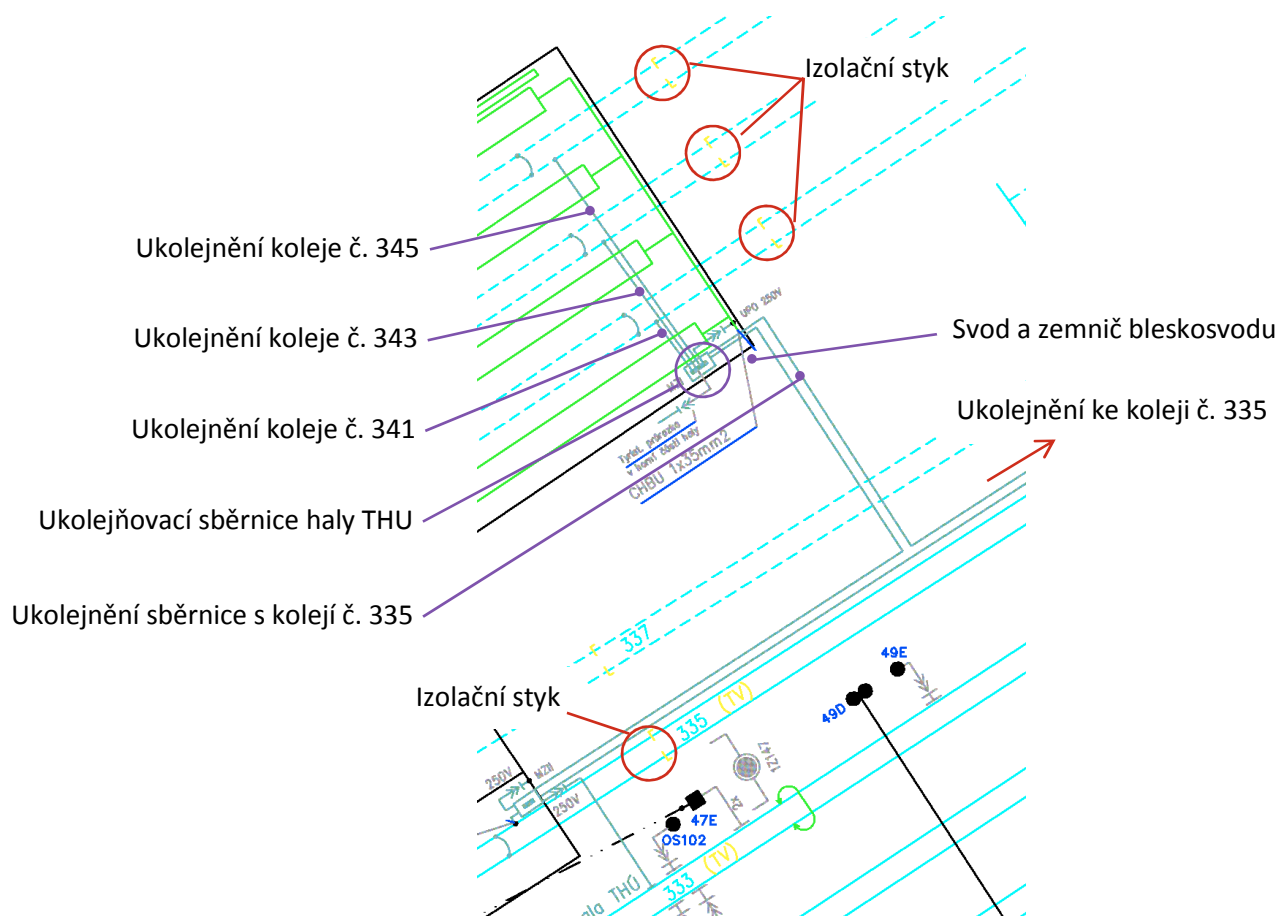
Následující měření navazovalo na předchozí výsledky. Účelem měření bylo specifikování místa nebo oblasti poruchy.

#### Metodika měření

V následujícím měření bylo provedeno měření proudů tekoucích ukolejněním jednotlivých vnitřních kolejí č. 341, 343 a 345 (viz. následující schémata), celkovým ukolejněním haly k vnějšímu kolejišti (ke koleji č. 335) a svodem bleskosvodu, který byl vodivě spojen se zemničem.



Obr. 40 – Schéma rozmístění kolejí a ukolejnění



Obr. 41 – Schéma ukolejnění a rozmístění měřicích míst



Postup měření byl následující:

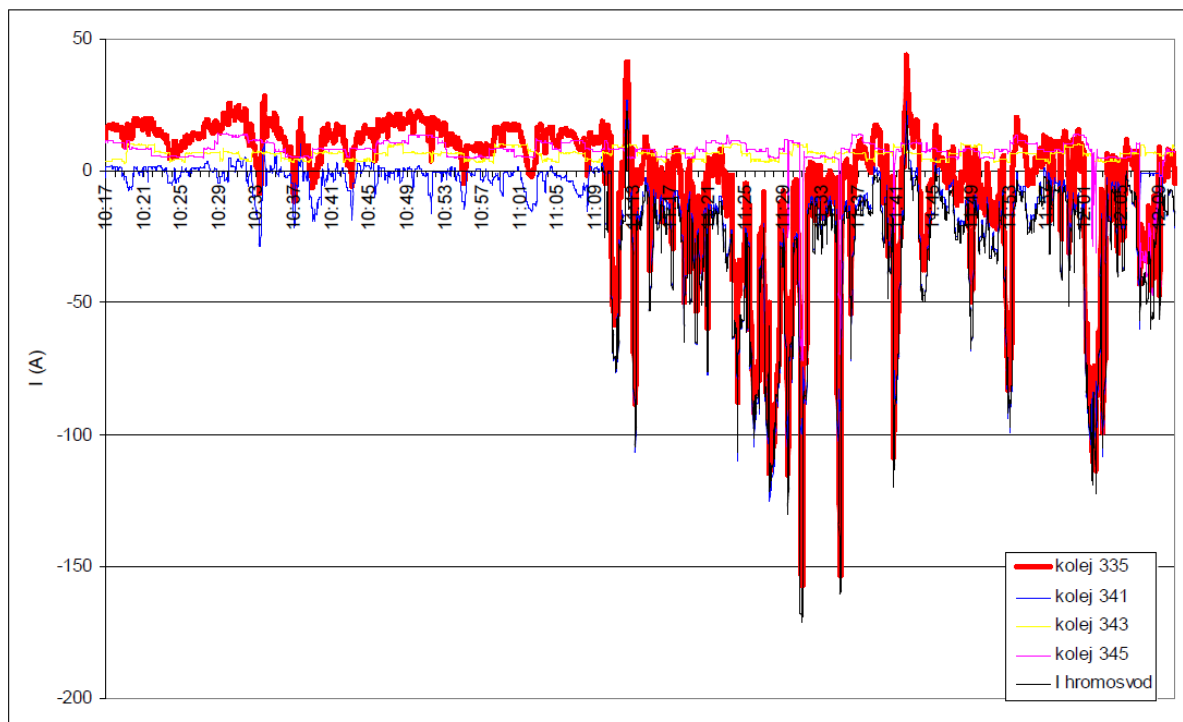
- měření probíhalo za běžného provozu
- byly měřeny provozní proudy, bez připojení zvláštního zdroje
- bylo měřeno prostřednictvím klešťových ampérmetrů, připojených na ukolejňovací vedení jednotlivých kolejí v hale, celkové ukolejňovací vedení haly k vnějšímu kolejišti a měřicí sondou, stejnosměrného proudu, navlečenou na svodu bleskosvodu
- po předchozím nastavení PC software a zapojení měřicího obvodu již měření probíhalo automaticky
- měření bylo prováděno po dobu několika hodin a průběhy byly zaznamenávány v PC (shodně, jako v předcházejícím měření)

### Průběh měření

Měření probíhalo ve dvou blocích. V prvním byly měřeny proudy ukolejněním jednotlivých kolejí a celkovým ukolejněním, přičemž svod bleskosvodu byl rozpojen (měření probíhalo v čase od 10:17 do 11:09). Tohle měření, dle grafu na Obr. 42, naznačuje určitý problém v koleji 341, pro konečné tvrzení však není zcela průkazné, pouze potvrdilo domněnku z předchozího měření, že při rozpojení bleskosvodu proud, z haly do země, buď neteče vůbec, nebo jen v omezené míře. Ve druhém bloku pak měření probíhalo přesně podle výše popsané metodiky.

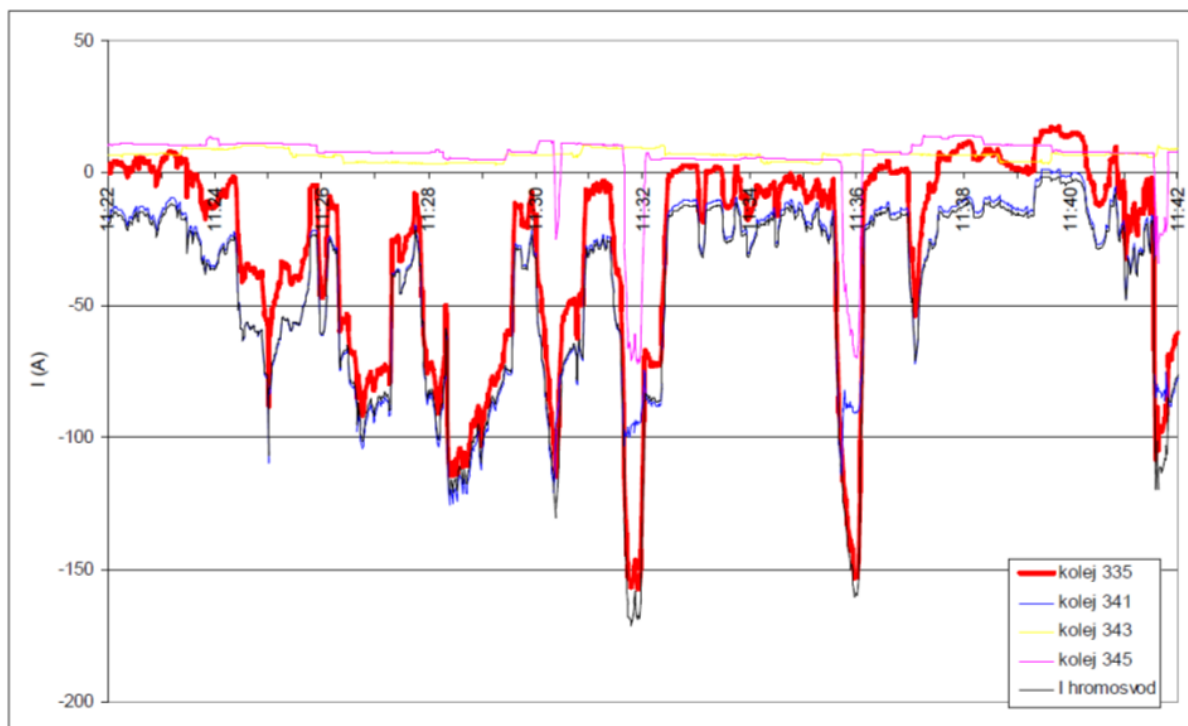
### Výsledky měření

Výsledek měření potvrdil hypotézu z předchozího měření, že proud uniká do konstrukce haly vadnou izolací. Celkový průběh měření je zaznamenán v grafu na Obr. 42.



Obr. 42 – Celkový průběh naměřených proudů

Z grafu na Obr. 42 a 43 lze vyčíst následující. Z koleje 343 teče proud vždy ukolejňovacím vedením směrem od koleje do ukolejňovací sběrnice v hale, lze tedy tvrdit, že izolace pod touto kolejí je v pořádku. Kolej 345 teče občasně (při zvýšeném průtoku proudu hlavním ukolejňováním haly) proud z ukolejňovací sběrnice směrem ke koleji. Z tohoto lze usoudit vadnou izolaci kolejnice, přičemž závada není fatální, ale dochází zde k průrazu izolace při určitém zvýšení napětí (potenciálu mezi kolejí a zemí). Průběhy proudu na koleji 341 odpovídají průběhům proudů v hromosvodu a v celkovém ukolnění haly. Vadnou izolaci pak prokazuje také tok proudu z ukolejňovací sběrnice směrem do kolejnice.



Obr. 43 – Průběh naměřených proudů (výsek v čase 11:22 až 11:42)

### 5.2.3 Dohledání příčiny vzniku bludných proudů

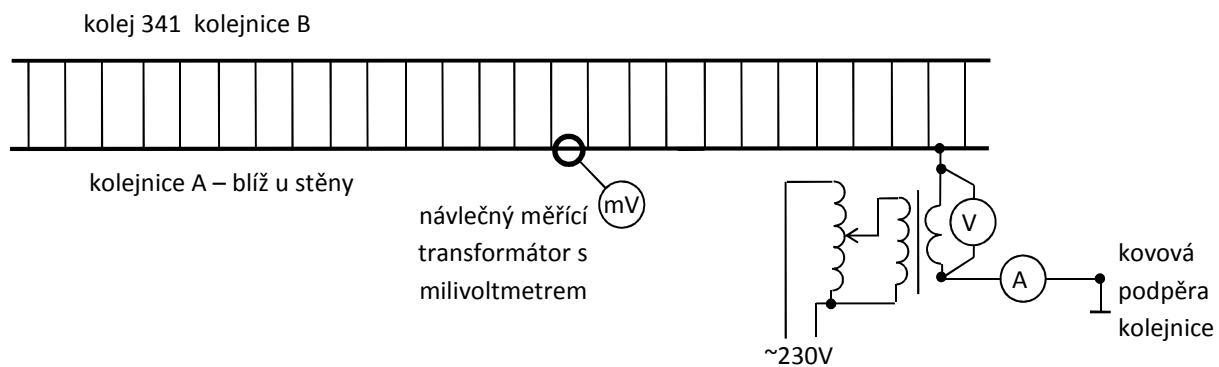
Tohle měření bylo provedeno za účelem dohledání konkrétního místa poruchy a především k ověření předchozího měření. Měření bylo provedeno pouze na koleji 341, která vykazovala nejzávažnější poruchu. Metoda měření, využitá k tomuto účelu, se neřadí mezi typické metody měření na zpětné cestě.

#### Metodika měření

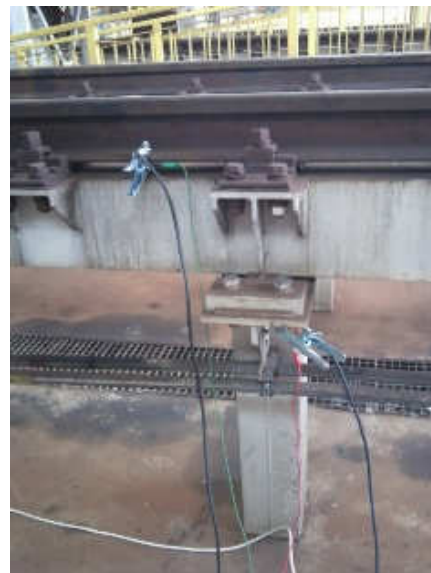
Měření bylo provedeno přímým měřením proudu tekoucího kolejnicí. Metoda byla následující:

- kolej je uvolněna, bez soupravy
- kolejnice jsou rozpojeny, jsou odpojeny od vnějšího kolejiště
- mezi kolejnicí a konstrukcí haly je vřazen regulovatelný zdroj malého střídavého napětí, schopný dodat proud 50 až 100 A (autotransfómátor a snížovací transformátor)
- je měřeno napětí a proud na zdroji střídavého napětí (na sekundární straně transformátoru)

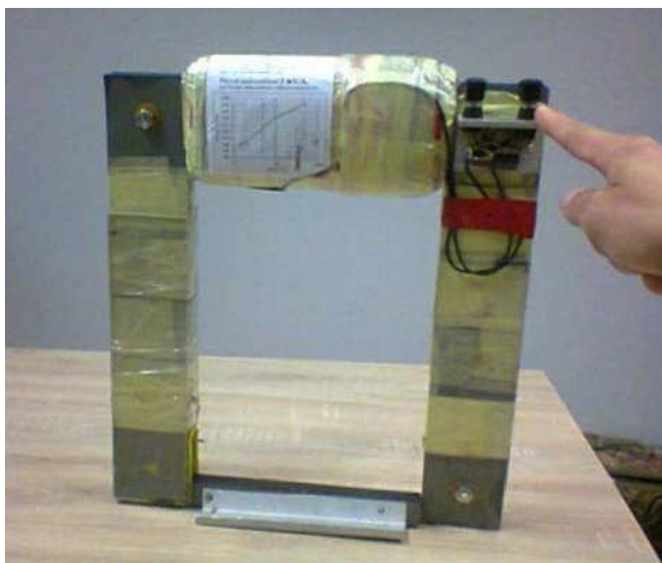
- proud v kolejnici se měří speciálním návlečným transformátorem, který je posouván po kolejnici do doby poklesu proudu (detekce poruchy)
- měření se opakuje pro druhou kolej



Obr. 44 – Schéma zapojení pro měření dohledání chyby

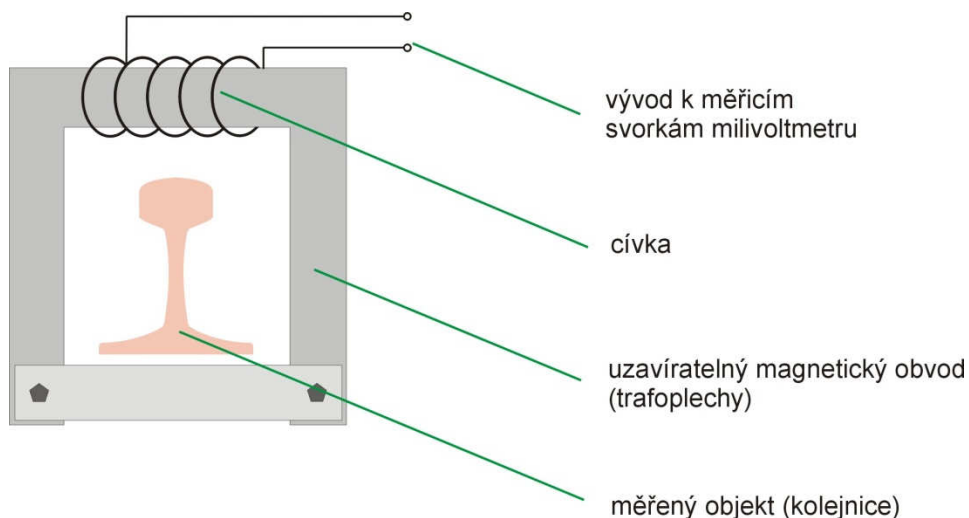


Obr. 45 – Průběh měření a připojení zdroje napětí na měřený objekt



*Obr. 46 – Návlečný měřicí transformátor*

K účelu tohoto měření byl sestrojen měřicí transformátor, konstrukčně přizpůsobený k navlečení na kolejnici. Transformátor je schopen měřit proudy v rozsahu 10 až 200 A s rozlišením cca 1 A. Před uvedením do provozu byl transformátor odzkoušen a kalibrován v laboratoři i na širé trati. Kalibrace probíhala s vloženým měděným vodičem do uzavřeného magnetického obvodu. Schematický náčrt měřicího transformátoru je na Obr. 47.

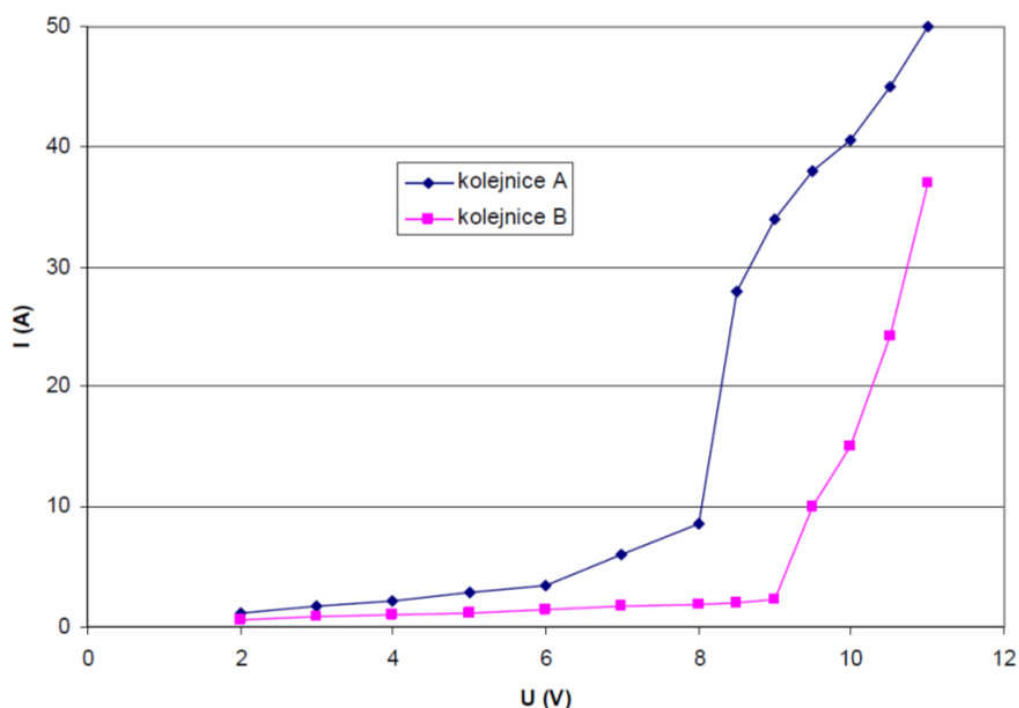


*Obr. 47 – Schematické znázornění měřicího transformátoru*

Jako regulovatelný zdroj napětí byl použit autotransformátor, sériově spojený se snižovacím transformátorem, který byl vyroben navinutím vodiče (sekundární vinutí) na jádro s primárním vinutím, vymontované z vyřazeného autotransformátoru.

## Průběh měření

Před samotným měřením proudů v kolejnicích bylo provedeno orientační měření voltampérové charakteristiky průrazu izolace v měřené koleji (viz. Obr. 48). Měřené hodnoty byly střídavé, efektivní. Při napájení stejnosměrným napětím by nastal průraz při hodnotě odpovídající amplitudě měřených střídavých hodnot. Průraz na kolejnici A nastal při hodnotě 8 V, na kolejnici B při hodnotě 9 V. Během měření na kolejnici B došlo k určitému záchvěvu měřených hodnot (mezi dvěma zaznamenanými body, v grafu je neprůkazné), pravděpodobně se jednalo o proražení další izolační podložky. Je pravděpodobné, že při zvyšování napětí by docházelo k lavinovitému průrazu dalších izolačních podložek.

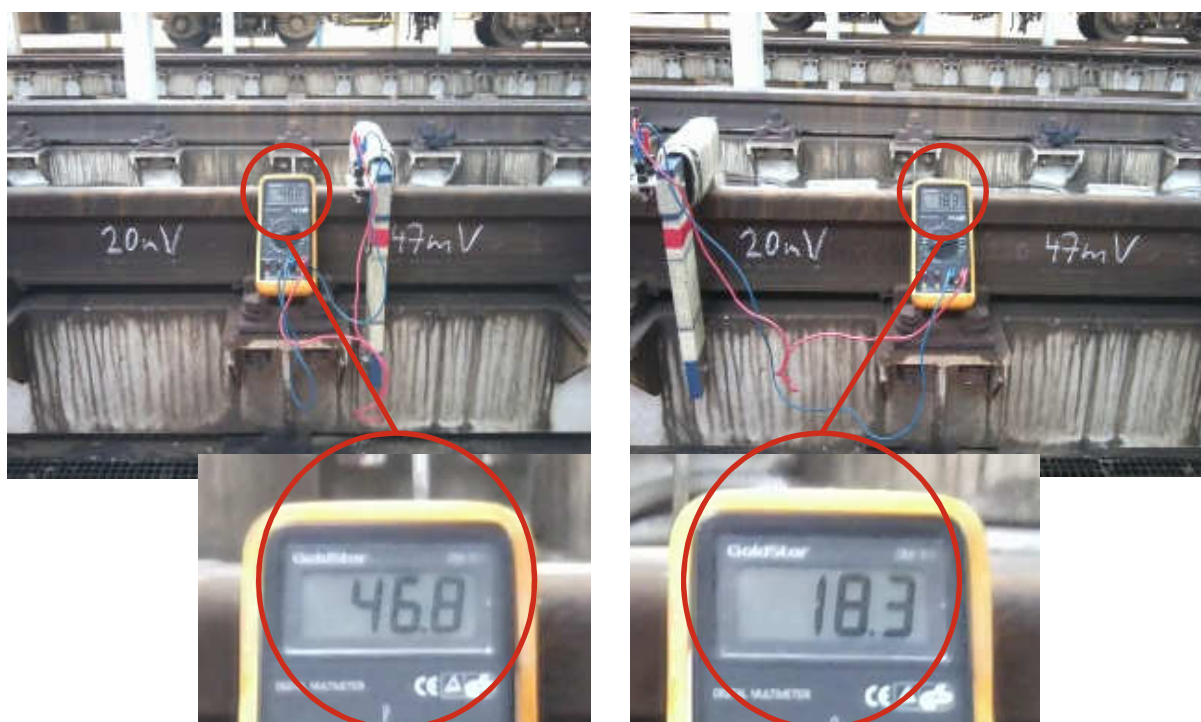


Obr. 48 – Voltampérové charakteristiky průrazu izolace

Izolační podložky byly také zkoušeny, zda se nesníží jejich izolační schopnost při mechanickém zatížení. Při tomto měření byl zaznamenáván proud tekoucí ze zdroje do kolejnice a jeho změny při průjezdu lokomotivy po měřené koleji. Sledovaný proud se při průjezdu lokomotivou zvýšil z cca 40 A na cca 50 A. Určité snížení izolační schopnosti bylo tedy zaznamenáno, nebylo však pro vznik poruchy rozhodující.

Měření proudu, tekoucího kolejnicí, proběhlo navlečením měřicího transformátoru na kolejnici a odečtením hodnoty z milivoltmetru, zapojeného k měřicímu transformátoru. Měření se opakovalo po celé délce kolejnice, přičemž poruchové místo bylo identifikováno náhlým poklesem měřeného proudu. Při měření byl proud tekoucí ze zdroje do kolejnice stále udržován v rozmezí cca 40 až 50 A.





Obr. 49 – Způsob zjištění vadné izolační podložky

Přesný převod mezi odečteným napětím a skutečně protékaným proudem nebyl proveden, pro tohle měření byla směrodatná identifikace náhlých poklesů měřených hodnot.

Pro urychlení měření v daných podmínkách bylo výhodné neuzavírat magnetický obvod měřicího transformátoru. Pravděpodobně se tím zvýšila chyba měření, stále však nepřekročila únosnou mez. Orientační převod měřicího transformátoru v daných podmínkách byl cca  $1 \text{ mV/A}$ .

### Výsledky měření

Měření jednoznačně potvrdilo, že příčinou vzniku bludných proudů v okolí haly je porucha na izolaci mezi kolejnicí a konstrukcí haly. Na koleji 341 byly identifikovány tři vadná místa:

- u patky č. 57, od karvinské strany na kolejnici A
- u patek č. 240 a 252, od karvinské strany na kolejnici B

Okolí místa poruchy vykazovalo značné zahřívání (potvrzovalo správnost měření). Teoreticky by se poruchová místa dala dohledat měřením teploty (například termokamerou). Touto metodou bychom ale nedostali představu o velikosti protékaného proudu a také bychom nemuseli zaznamenat nejfatálnější poruchy (kovový styk, při němž se dané místo vůbec nemusí zahřívat).



*Obr. 50 – Patka 57 od karvinské strany, kolejnice A*



*Obr. 51 – Patky 240 a 252 od karvinské strany, kolejnice B*

Při dodatečném měření byla patka 57 na kolejnici A rozebrána (viz. Obr 52). Po rozpojení všech čtyř šroubů přestal kolejnicí protékat proud. Jeden šroub byl evidentně poškozený dlouhodobým působením proudu, přičemž izolační průchodka v okolí tohoto šroubu byla zcela zničena. Nelze tedy jednoznačně říct, jestli prvotní příčina průrazu byla v izolační průchodce, nebo v izolační podložce pod kolejnicí.

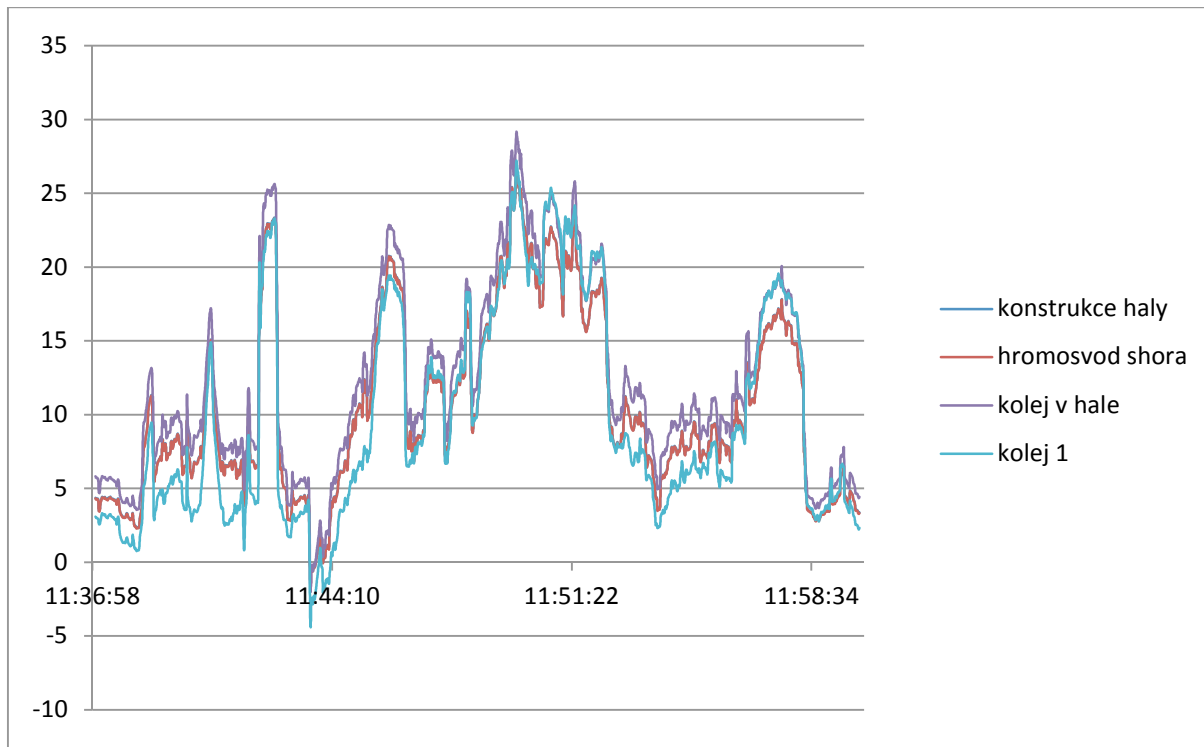
Dále bylo zvyšováno napětí na kolejnici až do průrazu další izolace, přičemž vadná patka 57 byla stále rozpojena. K průrazu došlo při zvýšení napětí na hodnotu v rozmezí 15 až 20 V. Tímto bylo prokázáno, že při opravě jednoho vadného místa se objeví další vadné místo, které se do té doby jevilo v pořádku.



Obr. 52 – Rozebrání patky 57a její poškození

### 5.3 Vyhodnocení měření

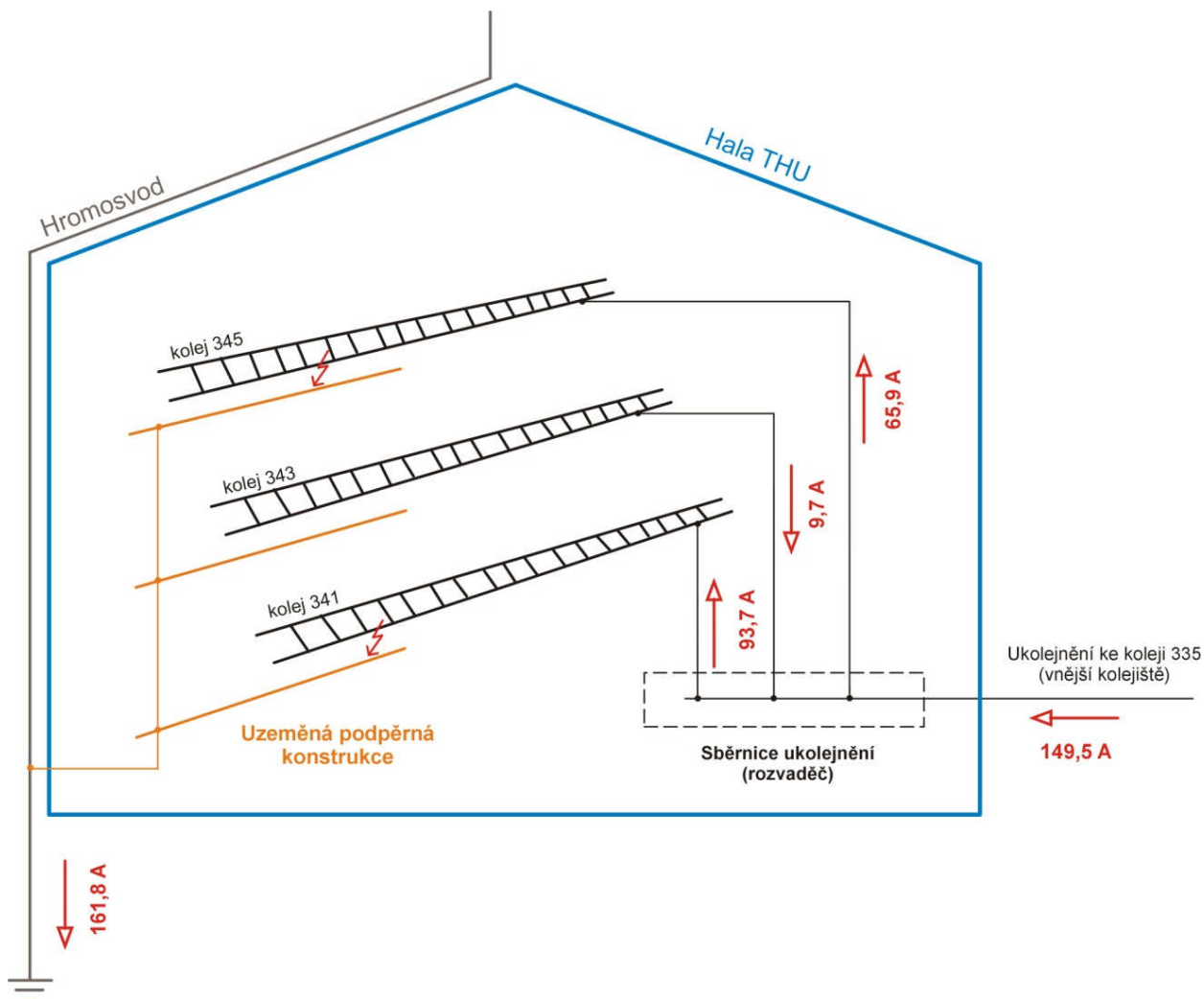
Měření potenciálů v hale THU a jejím okolí jednoznačně potvrdilo domněnku, vytvoření vodivé cesty mezi vnějším kolejištěm, konstrukcí haly a hromosvodem. Tohle tvrzení potvrzuje shodný průběh napětí sledovaných potenciálů (viz. Obr. 53). Konstrukce haly a hromosvod mají průběhy zcela totožné, což značí takřka ideální kovové spojení těchto dvou prvků.



Obr. 53 – Průběhy potenciálů



V dalším měření byly sledovány proudy tekoucí halou, za účelem nalezení místa úniku proudů z kolejí do hromosvodu, respektive do konstrukce haly a hromosvodu. Pro názorné vysvětlení je podrobněji rozebrána situace v čase 11:35:55 (viz. Obr. 54).



Obr. 54 – Tok proudů halou THU pro sledovaný čas (11:35:55)

Ukolejňovacím lanem teče z kolejiště proud do haly. Dalším zdrojem proudu je kolej 343, na které v té době stála souprava a na níž probíhal provoz. Ve sběrnici ukolejnění v hale dochází přerozdělení těchto proudů, které pak tečou do kolejí 341 a 345. Z kolejí se proud dostává do ocelové konstrukce, která podepírá koleje, a odtud se přes hromosvody uzavírá do země. Dle I. Kirchhoffova zákona platí:

$$I_{\text{celk.ukolejnění}} + I_{\text{kolej 343}} = I_{\text{kolej 341}} + I_{\text{kolej 345}} \quad (5.1)$$

$$I_{\text{kolej 341}} + I_{\text{kolej 345}} = I_{\text{hromosvod}} \quad (5.2)$$

Tedy:

$$149,5 + 9,7 \approx 93,7 + 65,9 \quad (5.3)$$

$$93,7 + 65,9 \approx 161,8 \quad (5.4)$$

Z čehož jednoznačně vyplývá, že příčinou protékání proudů přes hromosvody je vadná izolace mezi kolejnicemi a ocelovou konstrukcí. Drobná odchylka naměřených hodnot je stále v toleranci daného měření.

Pod jednou kolejí se nachází cca 1500 izolačních podložek. Předchozí měření dokázalo, že minimálně jedna izolační podložka je vadná, přičemž vadných podložek může být několik, v krajně nepravděpodobném případě i všech 1500.

Pro přesnou lokalizaci vadné izolace bylo využito metody k měření proudu, procházejícího kolejnicí. Použitá metoda nepatří mezi standardně užívané metody měření na zpětné cestě trakčního obvodu. K účelu měření byla kolej rozpojena a byl k ní připojen regulovatelný externí zdroj napájení, s malým střídavým napětím, schopný dodávat proud cca 50 A. Snímání proudu probíhalo prostřednictvím speciálně, pro tento účel, vyrobeným měřicím transformátorem, který se dá navléct na kolejnici. Poruchu pak signalizoval náhlý pokles měřeného proudu. Podrobnější popis měření je výše.

Tímto způsobem byla měřena jen kolej 341, jenž vykazovala nejvážnější poškození. Dohledány byly tři vadná místa:

- u patky č. 57, od karvinské strany na kolejnici A
- u patek č. 240 a 252, od karvinské strany na kolejnici B

Rozebrání patky č. 57 potvrdilo správnost měření a jeho interpretaci. Po uvolnění všech šroubů, držící danou patku, přestal kolejnicí protékat proud, přičemž jeden ze šroubů, a jeho okolí, bylo očividně poškozeno dlouhodobým působením protékajícího proudu.

Po určitém zvýšení napětí zdroje došlo k průrazu další izolace, která se do té doby jevila v pořádku, přičemž patka 57 byla stále rozpojena. Je tedy nanejvýš pravděpodobné, že při rozebrání další poškozené patky by docházelo k lavinovitému prorážení dalších izolací, které do té doby nejevily známky poškození. V tu chvíli bylo měření ukončeno, smysluplné pokračování v měření by bylo jen v případě současné opravy vadných patek.

## **5.4 Navrhované způsoby odstranění problému**

Způsobů zamezení průtoku proudů halou existuje několik, s různou složitostí řešení, cenou a jistotou trvanlivosti.

- instalace průrazky napětí
- oprava poškozených izolačních podložek
- kompletní výměna všech izolačních podložek
- instalace vlastního zdroje napětí
- zkvalitnění zpětné cesty
- instalace usměrňovací diody do ukolejňovacího vedení
- odizolování podpěrné ocelové konstrukce

### **5.4.1 Instalace průrazky napětí**

Nejlevnějším a nejjednodušším zamezením průtoku proudů přes halu je vřazení průrazky napětí mezi svod a zemnič bleskosvodu, popřípadě mezi konstrukcí haly a bleskosvod. Tento způsob opravy byl proveden, přičemž došlo k destrukci průrazky a obnovení problému. Proč se tak stalo, nebylo přesvědčivě prokázáno. Naměřené hodnoty potenciálů nebyly nikdy tak vysoké, aby průrazku dokázaly zničit. Vysvětlení se nabízí několik, ve sledované době k žádnému rapidnímu zvýšení napětí

nemuselo vůbec dojít, přičemž jindy se tak může dít běžně. Dále může docházet ke krátkodobým zvýšením napětí vlivem přechodových dějů. Tento jev by pak provedené měření nezaregistrovalo, jelikož měření bylo koncipováno jako dlouhodobé se sekundovými periodami snímání měřených hodnot.

#### **5.4.2 Oprava poškozených izolačních podložek**

Tato oprava patří mezi nejlevnější možná řešení. Bylo ovšem prokázáno, že průraz izolačních podložek závisí na velikosti napětí. Oprava pouze najitých vadných podložek by tedy pravděpodobně neměla dlouhé trvání, jelikož by v nejbližší době došlo k vytvoření nového vadného místa, čímž by se měření a oprava opakovala.

#### **5.4.3 Kompletní výměna všech izolačních podložek**

Tohle řešení se jeví jako nejvhodnější, ačkoli finančně náročnější než předchozí dvě. Pro zamezení opakování shodné poruchy je výhodné použít kvalitnějších izolačních podložek a průběh výměny pečlivě sledovat a kontrolovat dodržování technologických procesů. Při výměně podložek je také výhodné provádět průběžná měření izolačního stavu. Nevýhoda tohoto řešení je ve stále přetrvávajícím, nebo zhoršení, problému s jiskřením.

#### **5.4.4 Zkvalitnění zpětné cesty**

Tato možnost vychází z předpokladu, že při dokonalé zpětné cestě (nulový odpor) veškeré proudy tečou jen kolejnicemi a neunikají do země. Vyžadovala by náročnou kontrolu a měření, mezi sousedními napájecími stanicemi, všech propojek mezi kolejnicemi, podélného propojení kolejnic a stykových transformátorů, zjištění nedokonalých míst a jejich zkvalitnění. I přes veškeré úsilí ale ideálního případu nikdy nelze dosáhnout, tudíž by se problém zcela nevyřešil, pouze zmírnil. Tímto by se také zmírnilo jiskření při dotyku kolejnice se zemí a to nejen v samotné hale, ale v i v celé oblasti mezi sousedními napájecími stanicemi.

#### **5.4.5 Instalace vlastního zdroje napětí**

Instalací vlastního zdroje napětí 3 kV pro stojany na předtápění souprav, popřípadě trolej v hale, by došlo k nejjistějšímu a nejspíše i k nejtrvalejšímu vyřešení všech zmíněných problémů. Za předpokladu vlastního napájení se propojení vnitřních kolejí s vnějším kolejištěm může vynechat, tudíž se do haly nebudou kudy dostávat cizí proudy z venku. Veškeré výhody tohoto řešení by však neplatily při přejíždění izolovaných styků na kolejnicích, platily by pouze za předpokladu, kdyby se izolované styky ve vhodném intervalu zdvojily. Další značnou nevýhodou je značná ekonomická náročnost. Výstavba vlastního zdroje 3 kV by vyžadovala rozvodnu 22 kV, transformátor, usměrňovač a rozvodnu 3 kV, také by veškeré zařízení vyžadovalo umístění do vhodných prostor (nejspíše výstavba nové budovy). Hrubý finanční odhad 1 MW zdroje je cca 10 mil. Kč.

#### **5.4.6 Instalace usměrňovací diody do ukolejňovacího vedení**

Jedná se o velice zajímavé řešení, patrně cenově výhodné. Největší část proudu teče ukolejňovacím lanem z vnějšího kolejiště do haly. Pokud by se na toto vedení umístila usměrňovací dioda tak, aby proud mohl téct pouze z haly ven a nikdy ne z haly dovnitř, problém by se tím výrazně snížil. Snížil by se i problém s jiskřením. Není však zcela jisté, zda takovéto řešení povoluje norma. Norma (EN 50 122) předepisuje celistvost kolejového obvodu, mluví o lanech a kolejnicových

propojkách. Bez další analýzy nelze tedy jednoznačně určit, zda by se dioda dala považovat za celistvý kolejový obvod.

Další nevýhoda spočívá v nebezpečí při poruše, kdy by se na kolejnici mohlo objevit vysoké, život ohrožující, napětí. Ten samý problém by teoreticky mohl nastat za předpokladu rekuperačního brždění, kdyby se v hale namontovala trolej. Při rozhodnutí o zřízení tohoto řešení je vhodné provést další měření nebo analýzu vhodnosti použití. Pokud se za současného stavu dokázaly na svodičíchbleskosvodů zničit napěťové průrazky, je možné, že stejný problém povede i ke zničení instalovaných diod.

#### **5.4.7 Izolování podpěrné konstrukce**

Jedná se pouze o teoretickou možnost, která by se nejspíše dala využít pouze u nově postavených konstrukcí. Při izolování konstrukce od země by se, i přes poruchu na izolaci pod kolejnici, neměl jak uzavírat obvod a tudíž by ani neprotékal proud. U takto velkého vodivého tělesa ale musí být zajištěna ochrana proti nebezpečnému dotykovému napětí, tedy uzemnění, buď přímo, nebo přes průrazku, čímž by se ale problém nevyřešil. Je tedy otázkou, zdali existuje v normě prostor pro takovéto řešení a jestli je z hlediska bezpečnosti vhodné. K této problematice lze odkázat na normu ČSN 34 1500: Základní předpisy pro elektrické trakční zařízení, popřípadě např. na služební rukověť Českých drah SR 5/7, s názvem: Ochrana železničních mostních objektů proti účinkům bludných proudů.

## Závěr

Tato diplomová práce se zabývá nepříznivými vlivy pozorovanými ve vlakové stanici Bohumín, přímo spojenými s bludnými proudy. Práce vychází z terénních měření, prováděné ve vlakové stanici Bohumín v hale technickohygienické údržby (THU) a jejím nejbližším okolí. Hlavním cílem bylo identifikovat cizí vodivé cesty, které umožňovaly tok proudů skrze hromosvodovou soustavu sledované haly. Tyto proudy pak způsobovaly nadměrné zahřívání svodů hromosvodů, vedoucí až k jejím zničení. Dále se práce zabývá možnostmi řešení zjištěných problémů.

Z hlediska problematiky bludných proudů leží Bohumín v nevýhodné pozici. Z velkých vlakových stanic se Bohumín nachází nejbližše středu dvou napájecích stanic, leží mezi měnirami Dětmárovice a Ostrava Svinov. Danou problematiku zhoršuje značný provoz ve stanici.

Pozorovaným jevem řešeného problému bylo nadměrné zahřívání hromosvodových svodů na hale THU. Prvotní řešení problému bylo provedeno vřazením průrazky mezi svodem a zemničem bleskosvodu. Po uvedení do provozu se průrazka projevovala četným spínáním, které vyústilo v její zničení. V hale THU, na níž probíhala většina měření, se nachází tři koleje, namontovány přes izolační podložky k ocelové konstrukci.

Ke zjištění příčin vzniku poruchy na hromosvodu byla provedena série tří, na sebe navazujících, měření. První měření mělo za cíl určit zdroj proudů tekoucích hromosvodem. Měřily se potenciály, mimo jiné, na konstrukci haly, hromosvodu, kolejích v hale a kolejišti vně haly, přičemž hromosvody byly vůči zemničům rozpojeny. Měření probíhalo po dobu bezmála 24 hodin, vzorkováno bylo po 1 s. Výsledky prokázaly vodivé spojení konstrukce haly, hromosvodu, kolejí v hale i kolejiště vně haly, tedy vadnou izolaci buď přímo kolejnic, nebo ukolejňovacího lana. Hlavní zdroj proudu, tekoucího přes hromosvod, je ve vnějším kolejišti, v menší míře vzniká určitý proud provozem v hale.

Druhé měření bylo provedeno k identifikaci místa poruchy izolace. Měřily se proudy tekoucí hromosvodem, ukolejňovacími lany jednotlivých kolejí v hale a celkovým ukolejňováním k hlavnímu kolejišti. Při tomto měření byly hromosvody se zemniči spojeny. Celkovým ukolejňovacím lanem tekla proud do haly, zde se rozdělil a tekla dvěma ze tří kolejí do konstrukce haly. Jedna kolej se jevila v pořádku, probíhal na ní provoz, proud z této koleje se pak rozdělil a tekla dvěma poškozenými kolejemi do konstrukce haly. Výsledek měření je přehledně znázorněn na Obr. 54. Tohle měření ukázalo na vadné izolační podložky pod kolejnicemi.

Třetí měření mělo za cíl potvrdit výsledky z předchozího měření a dohledat konkrétní vadné izolační podložky. Při tomto měření se měřil proud tekoucí kolejnicí. K tomuto účelu byl sestaven speciální měřicí transformátor, konstrukčně přizpůsobený k navlečení na kolejnici. Měření proudu pak probíhalo posouváním transformátoru po kolejnici, přičemž vadnou podložku signalizoval náhlý pokles měřených hodnot. Tímto měřením bylo dohledáno několik vadných izolačních podložek, čímž se prokázala pravdivost měření předcházejícího. Při opravě pouze poškozených podložek hrozí riziko průrazu dalších, do té doby bezporuchových, podložek. Tohle bylo prokázáno dodatečným měřením, kdy se po rozpojení jedné vadné izolační podložky prorazila podložka další, která se do té doby jevila v pořádku.

Z výše vypsanych možností oprav se jako nejvhodnější, s ohledem na cenu a trvanlivost opravy, jeví výměna všech izolačních podložek za nové. Pro zamezení opakování shodné poruchy je výhodné použít kvalitnějších izolačních podložek a průběh výměny pečlivě sledovat a kontrolovat dodržování

technologických procesů. Při výměně podložek je také výhodné provádět průběžná měření izolačního stavu.

Tímto byl splněn rozsah zadání. Určení příčiny průrazu izolace by byl již nad rámec této práce a vyžadoval by další průzkum. Vzhledem k povaze prací v hale se tak pravděpodobně stalo vlivem stárnutí izolace. Je zvláštní, že prvotní oprava, v podobě vřazení průrazky mezi svod hromosvodu a zemnič, byla neúspěšná a vedla ke zničení průrazky. Proč se tak stalo, nebylo přesvědčivě prokázáno. Naměřené hodnoty potenciálů nebyly nikdy tak vysoké, aby průrazku dokázaly zničit. Vysvětlení se nabízí několik, ve sledované době k žádnému rapidnímu zvýšení napětí nemuselo vůbec dojít, přičemž jindy se tak může dít běžně. Dále může docházet ke krátkodobým zvýšením napětí vlivem přechodových dějů. Tento jev by pak provedené měření nezaregistrovalo, jelikož měření bylo koncipováno jako dlouhodobé se sekundovými periodami snímání měřených hodnot.

## Seznam použité literatury a zdrojů:

- [1] LANÁKOVÁ Gabriela., ŠINDLER Dalibor., *Napájanie elektrických dráh*. ALFA Bratislava 1989
- [2] PALEČEK Josef, *Vybrané kapitoly z problematiky elektrotechniky v dopravním inženýrství*, VŠB-TU Ostrava 1996
- [3] MACH, Veleslav. *Technika vysokého napětí*. 2., přeprac. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006, 111 s. ISBN 80-248-1161-8.
- [4] JANSÁ František, PELÁNSKÝ Štěpán: *Napájení elektrických drah III*, 2. vydanie Nitra: Alfa 1982, 196 s.
- [5] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [6] PELÁNSKÝ Štěpán, KUPKA Ľudovít: *Napájení elektrických drah I*, 1. vydanie Bratislava: Alfa 1975, 390 s.
- [7] PELÁNSKÝ Štěpán, JURKA Vladimír: *Napájení elektrických drah II, Trakční vedení – část 2.*, 1. vydanie Bratislava: Alfa 1971, 144 s.
- [8] PALEČEK Josef, *Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000, 98 s. ISBN 80-707-791-0.
- [9] MLČÁK Tomáš.: *Bludné proudy*, Ostrava 2009.
- [10] PALEČEK Josef, *Zemní proudová pole v okolí elektrizovaných tratí*, Ostrava, 2006. Dostupné z: <http://www.ateko.info/download/2006/palecek.pdf>
- [11] MACH, Veleslav. *Vybrané principy elektroenergetiky: Učební text*. Ostrava, 2013. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~mah30/>.
- [12] NOVÁK, P. *Druhy koroze kovů*. Praha, 2005. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF)
- [13] MATOUŠ, Jan. *Elektrické parametry koridorových tratí v souvislosti s korozí bludnými proudy*. Praha, 2011. Dostupné z: <http://www.ateko.info/download/2011/Prednaska-Matous.pdf>
- [14] MATOUŠ, Jan. *Nové měřicí metody ke zjištění kvality zpětné trakční cesty aplikované na koridorových tratích ČD*. Praha, 2002. Dostupné z: <http://www.railvolution.net/czechraildays/2002/seminare/nt24.pdf>
- [15] MATOUŠ, Jan. *Problematika bludných proudů na koridorových tratích Českých drah*. Praha, 2003. Dostupné z: [http://www.railvolution.net/czechraildays/2003/seminare/zi\\_09.pdf](http://www.railvolution.net/czechraildays/2003/seminare/zi_09.pdf)
- [16] SŽDC: *Mapové podklady*. In: SŽDC [online]. 2014 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://provoz.szdc.cz/portal/ViewArticle.aspx?oid=594598>
- [17] Nákrešný jízdní řád. *NJR* [online]. 2014 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: [http://www.iwan.eu07.pl/jw/2014/data/njr/png/L301b\\_305\\_d/index.html](http://www.iwan.eu07.pl/jw/2014/data/njr/png/L301b_305_d/index.html)

- [18] Železniční napájecí soustava: Mapa evropy. *Wikipedia* [online]. 2014 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD\\_nap%C3%A1jec%C3%AD\\_soustava](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD_nap%C3%A1jec%C3%AD_soustava)
- [19] *Základní ochranná opatření pro omezení vlivu bludných proudů na mostní objekty a ostatní betonové konstrukce pozemních komunikací*, TP 124 JEKU s.r.o., prosinec 2008
- [20] *Ochrana železničních mostních objektů proti účinkům bludných proudů*, SR 5/7 JEKU s.r.o., 1997
- [21] Stavební a technický řád drah. In: 177/1995 Sb. 1995.
- [22] ČSN 038365, *Zásady měření při protikorozi ochraně kovových zařízení uložených v zemi: Stanovení přítomnosti bludných proudů v zemi*, Únor 1987, Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1987.
- [23] ČSN 038350, *Požadavky na protikorozi ochranu úložných zařízení*, Zář 1996, Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [24] ČSN EN 50122-1 ed.2, *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení-Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod: Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem*, Listopad 2011, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
- [25] ČSN EN 50122-2, *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení: Část 2: Ochranná opatření proti účinkům bludných proudů, způsobených DC trakčními proudovými soustavami*, Červenec 2001, Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [25] ČSN 341500, *Základní předpisy pro elektrické trakční zařízení*, Praha: Český normalizační institut, 1977.
- [26] TNŽ 280002, *MECHANIKA VOZBY: Názvosloví*, Praha: Federální ministerstvo dopravy a spojů, 1988.
- [27] ČSN ISO 690-2(01 0197) *Informace a dokumentace - Bibliografické citace*. 1. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2000, 22 s.
- [28] *Výkresová dokumentace elektrizace železnice ve vlakové stanici Bohumín*
- [29] *Závěrečné zprávy z měření v Bohumíně*



## **Seznam příloh:**

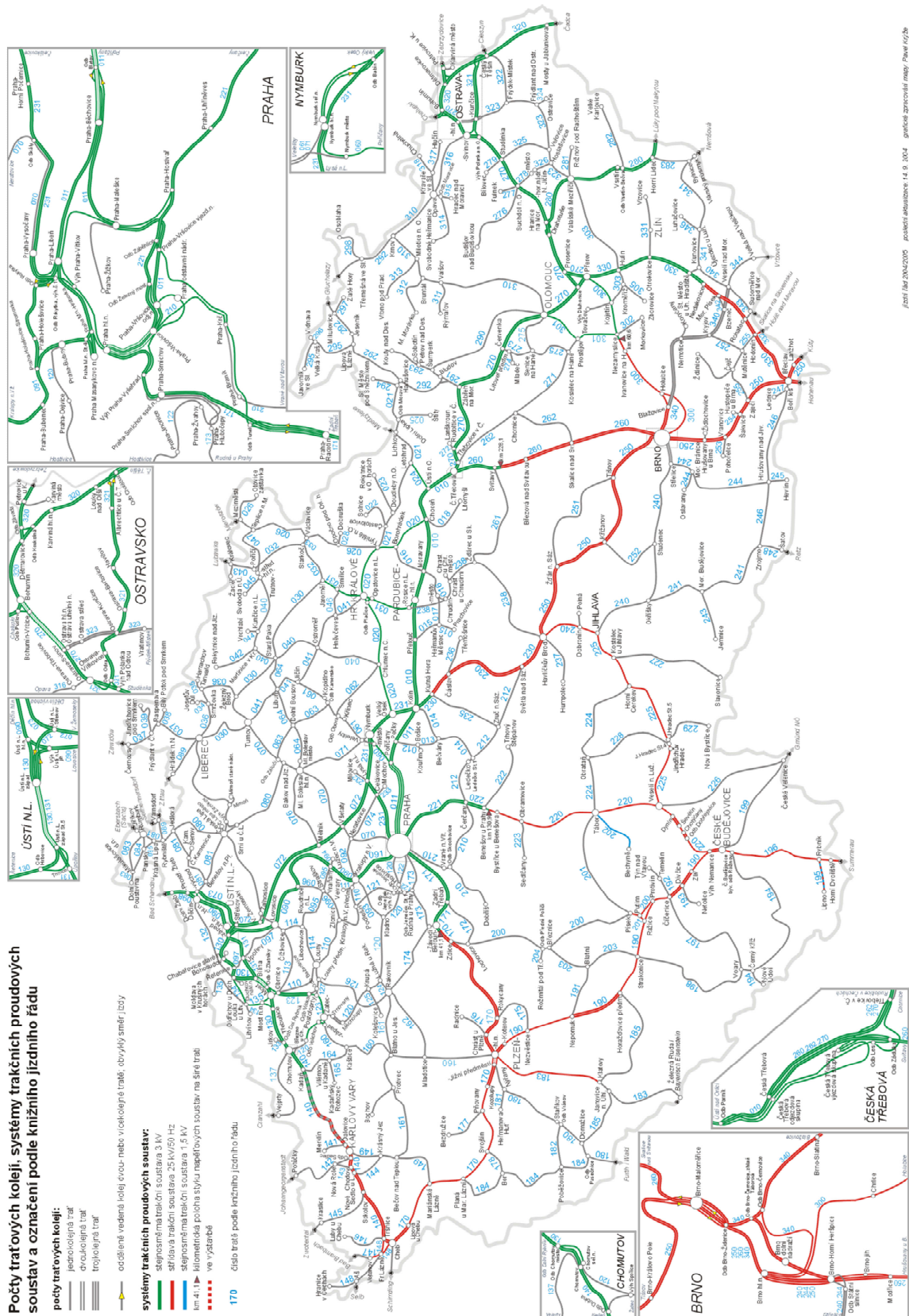
Příloha č. 1 – Mapa železnice ČR.

Příloha č. 2 – Modelový výpočet úbytků napětí v trakčním obvodu.

Příloha č. 3 – Úplný graf naměřených potenciálů v Bohumíně.

## Příloha č. 1

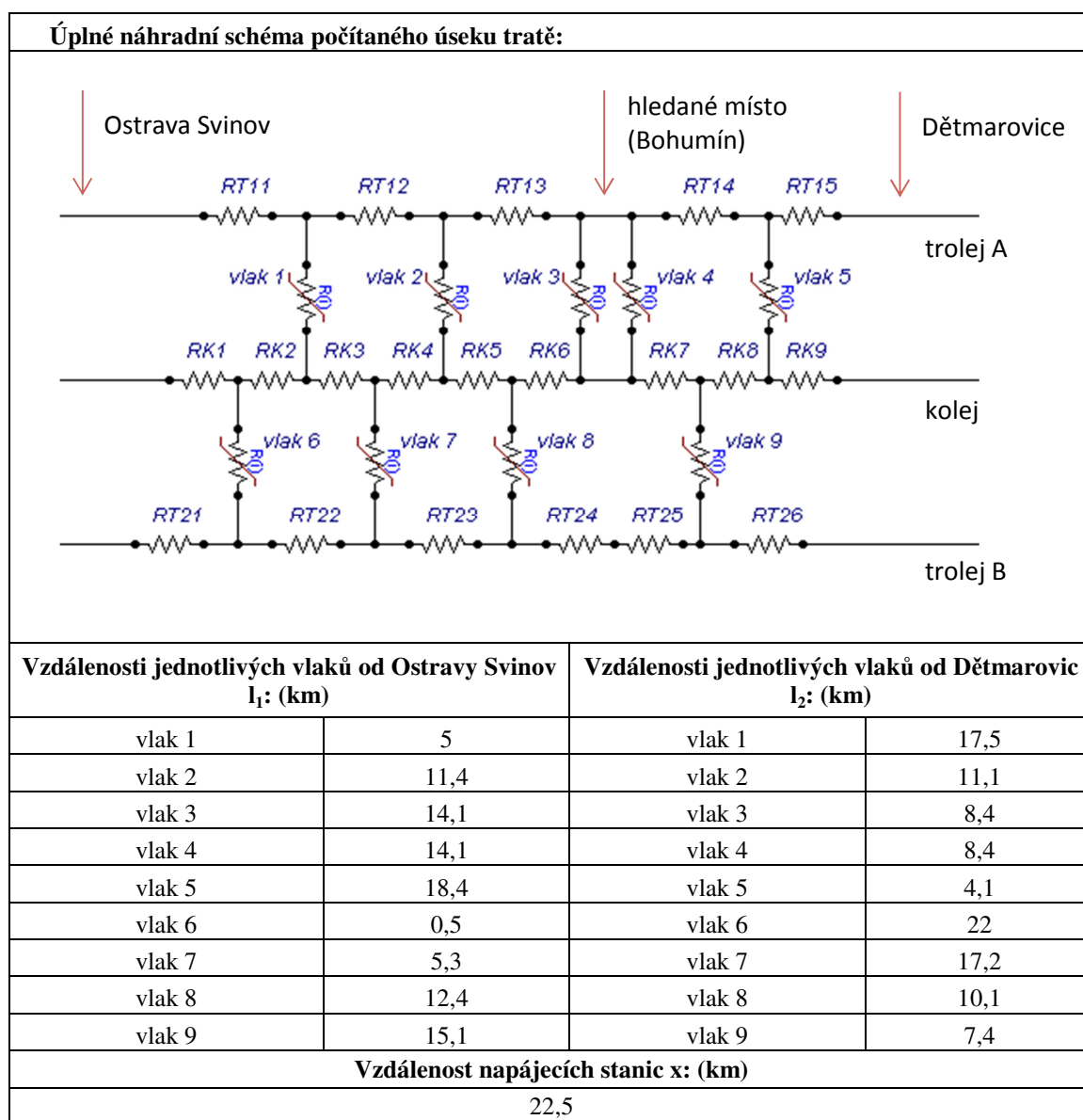
### Mapa železnice ČR [16]



železniční mapa ČR 2005, aktualizace 14. 9. 2004, grafická zpracování mapy Pavel Kříž

## Příloha č. 2

Modelový výpočet úbytků napětí v trakčním obvodu



Tab. 9 – Rozmístění jednotlivých vlaků na počítaném úseku tratě

Elektrické parametry tratě:						
Trolej		Nosné lano		Kolejnice		
typ	nejvyšší dovolený odpor ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	typ	nejvyšší dovolený odpor ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	typ	průřez $S_K$ ( $\text{mm}^2$ )	rezistivita $\rho_K$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )
150 $\text{mm}^2$ Cu	0,1195	120 $\text{mm}^2$ Cu	0,15	UCI 60	7686	0,243
Napětí na měnící U: (V)						
3300						

Tab. 10 – Elektrické parametry tratě

Rozdělení dílčích výkonů $P_{ij}$ : (kW)			
	zadaný výkon jednotlivých vlaků	od měřírny Ostrava Svinov:	od měřírny Dětmárovice:
		$P_{ij} = P_j \cdot \frac{l_2}{x}$	$P_{ij} = P_j \cdot \frac{l_1}{x}$
vlak 1	200	155,56	44,44
vlak 2	600	296,00	304,00
vlak 3	200	74,67	125,33
vlak 4	1600	597,33	1002,67
vlak 5	600	109,33	490,67
vlak 6	200	195,56	4,44
vlak 7	600	458,67	141,33
vlak 8	1600	718,22	881,78
vlak 9	200	65,78	134,22

Tab. 11 – Výkony jednotlivých vlaků

Výpočet odporů tratě:		
Trolejové vedení:	Dílčí odpory: ( $\Omega$ )	
$r_T = \frac{r_{trolej} \cdot r_{nosne\ lano}}{r_{trolej} + r_{nosne\ lano}}$	$R_i = r_i \cdot (l_{vm-1} - l_{vm})$	
0,066512 $\Omega$ .km-1	RK1	3,9525
<b>Koleje:</b> $r_K = \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho_K}{S_K}$	RK2	35,5725
	RK3	2,3715
	RK4	48,2205
	RK5	7,9050
0,007905 $\Omega$ .km-1	RK6	13,4385
	RK7	7,9050
	RK8	26,0865
	RK9	32,4105
	RT11	332,5603
	RT12	425,6772
	RT13	179,5826
	RT14	286,0019
	RT15	272,6994
	RT21	33,2560
	RT22	319,2579
	RT23	472,2356
	RT24	113,0705
	RT25	66,5121
	RT26	492,1892

Tab. 12 – Odpory dílčích úseku tratě

Napětí na sběračích jednotlivých vlaků $U_{vj}$ : (V)					
$U_{vj}^{(k)} = U_N - \Delta U_{vj}^{(k)}$					
	krok1	krok2	krok3	krok4	krok5
vlak 1	3300	3175,75	3165,74	3164,81	3164,73
vlak 2	3300	3042,52	3020,70	3018,67	3018,48
vlak 3	3300	3018,96	2994,92	2992,68	2992,47
vlak 4	3300	3018,96	2994,92	2992,68	2992,47
vlak 5	3300	3137,45	3124,40	3123,19	3123,08
vlak 6	3300	3285,51	3284,73	3284,68	3284,68
vlak 7	3300	3165,71	3157,61	3157,04	3157,00
vlak 8	3300	3074,38	3059,08	3057,97	3057,89
vlak 9	3300	3126,72	3115,06	3114,22	3114,16

Tab. 13 – Napětí na sběračích jednotlivých vlaků

Jelikož:

$$\Delta U_T \gg \Delta U_K$$

Můžeme si dovolit zjednodušení:

$$\Delta U_V = \Delta U_T$$

Vstupní úbytky napětí v místech jednotlivých vlaků $\Delta U_{vj}$ : (V)					
$\Delta U_{vj}^{(k)} = \sum_{i=1}^n \Delta U_i^{(k-1)}$					
	krok1	krok2	krok3	krok4	krok5
vlak 1	0	124,25	134,26	135,19	135,27
vlak 2	0	257,48	279,30	281,33	281,52
vlak 3	0	281,04	305,08	307,32	307,53
vlak 4	0	281,04	305,08	307,32	307,53
vlak 5	0	162,55	175,60	176,81	176,92
vlak 6	0	14,49	15,27	15,32	15,32
vlak 7	0	134,29	142,39	142,96	143,00
vlak 8	0	225,62	240,92	242,03	242,11
vlak 9	0	173,28	184,94	185,78	185,84

Tab. 14 – Vstupní úbytky napětí na sběračích jednotlivých vlaků

krok 1:	
dílčí úbytky napětí kolejí (V):	
3,1993	RK1
26,6375	RK2
1,6321	RK3
24,4187	RK4
2,5658	RK5
2,1538	RK6
5,5787	RK7
19,9909	RK8
30,7300	RK9
trolej A (V):	
124,2454	RT11
133,2355	RT12
23,5574	RT13
118,4837	RT14
162,5546	RT15
trolej B (V):	
14,4938	RT21
119,7916	RT22
91,3307	RT23
32,9561	RT24
19,3848	RT25
173,2771	RT26

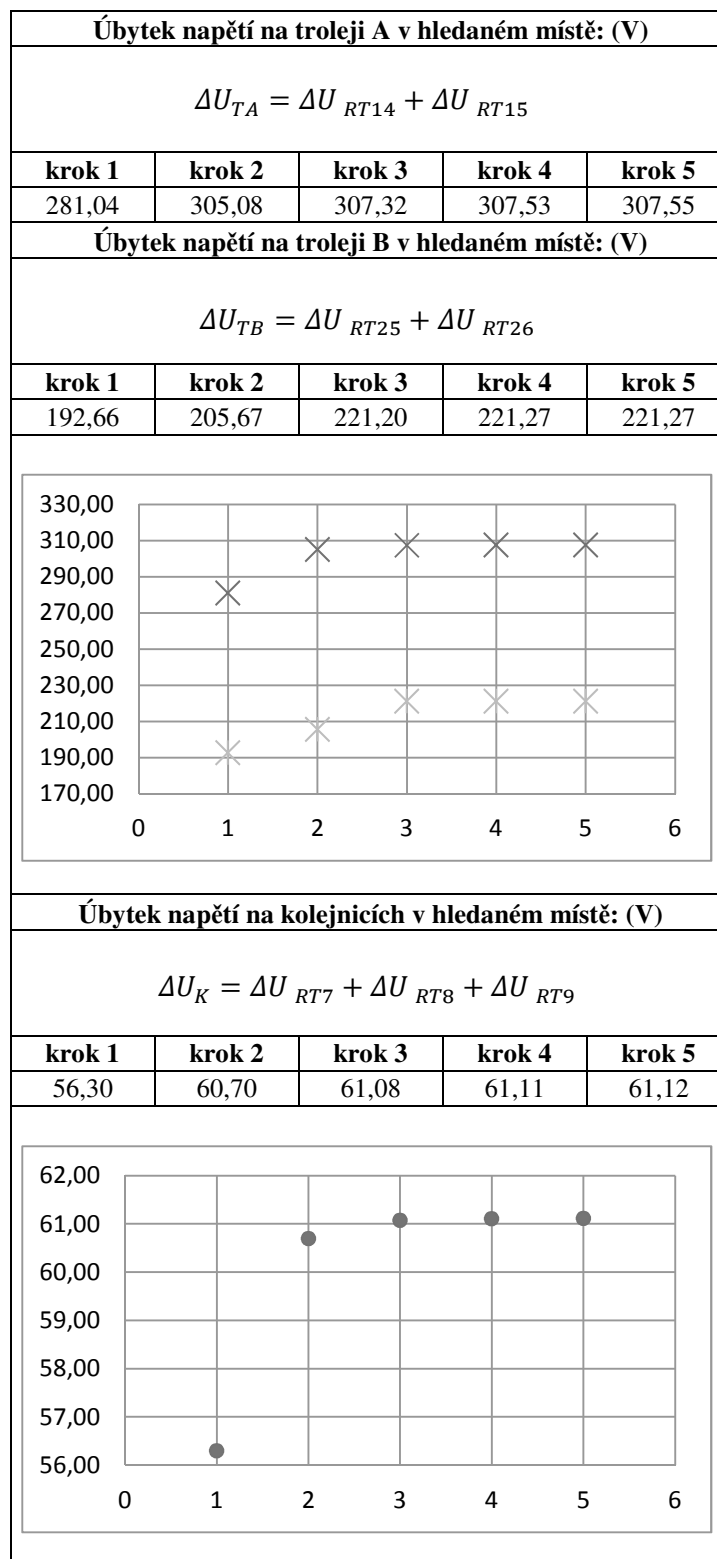
krok 2:	
dílčí úbytky napětí kolejí (V):	
3,4101	RK1
28,5255	RK2
1,7523	RK3
26,4918	RK4
2,7840	RK5
2,2610	RK6
6,0432	RK7
21,6112	RK8
33,0484	RK9
trolej A (V):	
134,2583	RT11
145,0426	RT12
25,7753	RT13
129,4738	RT14
175,6024	RT15
trolej B (V):	
15,2665	RT21
127,1238	RT22
98,5341	RT23
35,2525	RT24
20,7368	RT25
184,9350	RT26

krok 1:	
dílčí úbytky napětí kolejí (V):	
3,4276	RK1
28,6823	RK2
1,7623	RK3
26,6713	RK4
2,8022	RK5
2,2651	RK6
6,0834	RK7
21,7502	RK8
33,2470	RK9
trolej A (V):	
135,1860	RT11
146,1454	RT12
25,9847	RT13
130,5089	RT14
176,8071	RT15
trolej B (V):	
15,3208	RT21
127,6408	RT22
99,0691	RT23
20,8347	RT24
35,4189	RT25
185,7771	RT26

krok 4:	
dílčí úbytky napětí kolejí (V):	
3,4291	RK1
28,6958	RK2
1,7632	RK3
26,6870	RK4
2,8037	RK5
2,2650	RK6
6,0870	RK7
21,7623	RK8
33,2644	RK9
trolej A (V):	
135,2731	RT11
146,2489	RT12
26,0044	RT13
130,6062	RT14
176,9201	RT15
trolej B (V):	
15,3247	RT21
127,6781	RT22
99,1081	RT23
20,8418	RT24
35,4310	RT25
185,8381	RT26

krok 5:	
dílčí úbytky napětí kolejí (V):	
3,4292	RK1
28,6969	RK2
1,7633	RK3
26,6884	RK4
2,8038	RK5
2,2650	RK6
6,0873	RK7
21,7634	RK8
33,2660	RK9
trolej A (V):	
135,2813	RT11
146,2587	RT12
26,0062	RT13
130,6154	RT14
176,9307	RT15
trolej B (V):	
15,3247	RT21
127,6781	RT22
99,1081	RT23
20,8423	RT24
35,4319	RT25
185,8426	RT26

$$\Delta U_i^{(k)} = R_i \cdot \sum_{j=1}^m \frac{P_{ij}}{U_{N-j} \Delta U_{Vj}^{(k)}}$$



### Příloha č. 3

Úplný graf naměřených potenciálů v Bohumíně

